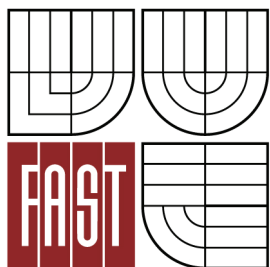




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

SOFTWAREVÉ PROSTŘEDKY PRO MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VE VODÁRENSTVÍ

SOFTWARE FOR SIMULATION OF WATER TREATMENT AND WATER DISTRIBUTION PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Pavliš

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ KUČERA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Pavliš
Název	Softwarové prostředky pro matematické modelování ve vodárenství
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

.....
doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

[1] TUHOVČÁK, L.; ADLER, P.; KUČERA, T.; RACLAVSKÝ, J.: Vodárenství. Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno: VUT v Brně, 2006. s. 1-223.

[2] American Water Works Association. Water Quality and Treatment : A Handbook of Community Water Supplies. Fourth Edition. New York : McGraw-Hill, 1990. 1193 s. ISBN 0-07-001540-6.

Zásady pro vypracování

Student vytvoří přehled počítačových programů, které lze využít pro simulaci procesů ve vodárenství. U vybraných programů podrobněji popíše jejich funkci. Cílem práce bude zjistit možnosti a dostupnost jednotlivých programů. Součástí bude i realizace jednoduchého vzorového příkladu s využitím vybraného programu. Volba programů bude prováděna dle pokynů vedoucího práce

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA

Abstrakt

Tento dokument je zaměřen na práci se softwary zaměřenými na problematiku matematického modelování ve vodárenství.

Je zde obsažen výčet a popis několika programů, jež jsou zaměřeny buď na statickou, nebo kvazi – dynamickou analýzu vodovodní sítě, či simulaci kvalitativních parametrů vody procházející touto sítí. Dále je zde zpracováno několik programů, které řeší ostatní hydraulické, či kvalitativní úlohy ve vodárenství.

Následně byly zvoleny dva programy – ARTS a Epanet – které byly rozebrány podrobněji a v obou byla provedena modelová analýza. V programu ARTS byla provedena analýza vodního rázu, v Epanetu bylo analyzováno stáří vody při průchodu tlakovou trubicí sítí.

Tato práce má přinést základní přehled v dostupných programech určených k práci vodárenských inženýrů a je prvním krokem k budoucí diplomové práci, jež by se zabývala hlouběji jedním z těchto programů.

Klíčová slova

matematické modelování, hydraulická analýza, kvalita vody, stáří vody, pattern, vodní ráz, expanzní nádoba

Abstract

This document aims on presentation of software focused on mathematic modelling in water treatment and water distribution.

It consists of a list and descriptions of a number of programs which use static or long-term analysis in examining hydraulics in water distribution systems and also examine water quality parameters. There are other programs also included in this thesis that solve different types of analysis or water engineering structures.

Then we can find elaborate descriptions of programs ARTS and Epanet and example analysis of both too. ARTS simulated waterhammer process and Epanet analysed water age through the water distribution system of a small village.

This thesis brings basic overview of available programs designated for engineers of water treatment and distribution systems and is also the first step for my future Master's thesis in which I would like to deeply focus on one of the programs.

Keywords:

mathematic modelling, hydraulic analysis, water quality, water age, pattern, waterhammer, air vessel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLIŠ, Jan. *Softwarové prostředky pro matematické modelování ve vodárenství*. Brno, 2013. 45 s. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Tomáše Kučery, Ph.D.

V Brně 23.května 2012

.....

Jan Pavliš

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval za vedení, ochotu a odborné rady při zpracování vedoucímu mé práce Ing. Tomáši Kučerovi, Ph.D. Poděkování také náleží Ing. Josefu Vychodilovi taktéž za vstřícnost a odborné rady.

OBSAH

1	ÚVOD.....	3
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	4
2.1	Teoretický úvod a pojmy.....	4
2.1.1	Spotřeba vody	4
2.1.2	Analýza průtoků v trubních tlakových sítích	5
2.1.3	Chemické reakce v rozvodech vodovodní sítě	5
2.1.4	Matematický model	6
2.1.5	Matematické modelování.....	6
2.1.6	Vodní ráz	6
2.2	Programy zabývající se matematickým modelováním ve vodárenství.....	8
2.2.1	WATPRO	8
2.2.2	SEWER+	9
2.2.3	WINPLAN	9
2.2.4	EPANET	10
2.2.5	AutoPEN.....	11
2.2.6	ARTS – hydraulic software design.....	12
2.2.7	HydrauliCAD.....	12
2.2.8	MIKE NET	13
2.3	Program ARTS – hydraulic software design	15
2.3.1	Seznámení.....	15
2.3.2	Systémové požadavky.....	15
2.3.3	Prostředí ARTS.....	15
2.3.4	Tvorba návrhu.....	16
2.3.5	Hydraulické analýzy / design.....	17
2.3.6	Práce s programem, tisk, export.....	20
2.3.7	Analýza vodního rázu – modelový příklad	21
2.3.8	Závěrečné zhodnocení analýzy programu ARTS	26
2.4	Program EPANET	27
2.4.1	Seznámení.....	27
2.4.2	Systémové požadavky a dostupnost Epanetu.....	28
2.4.3	Možnosti modelování hydraulických poměrů.....	28
2.4.4	Simulační model kvality vody	29
2.4.5	Analýza kvality vody – modelový příklad.....	34
2.4.6	Závěrečné zhodnocení analýzy/ programu Epanet	41
3	ZÁVĚR	42
4	POUŽITÁ LITERATURA.....	43
5	SEZNAM OBRÁZKŮ	44
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	45

1 ÚVOD

Tato práce má za svůj cíl zpracovat základní přehled programů používaných k matematickému modelování ve vodárenství. Ve své první části seznamuje s několika základními pojmy týkajícími se problematiky tématu a řešení úloh samotného modelování. V druhé části následuje výčet a charakteristika programů:

WATPRO
SEWER+
WINPLAN
EPANET
AutoPEN
ARTS – hydraulic software design
HydrauliCAD
MIKE NET

V poslední části se zaměřuje na dva vybrané programy (ARTS – hydraulic software design a Epanet), jimž se věnuje podrobněji, objasňuje základní principy jejich fungování a práce s modelovanými úlohami. Předmětem třetí části práce je také modelový příklad u těchto programů, kde dochází k názorné ukázce práce s programem, vyřešení typu příkladu i prezentaci možných forem výstupu analýzy. Nedílnou součástí tohoto dokumentu je i průběžná obrazová dokumentace umístěná v textu pro názornější představení jednotlivých programů a procesů, které v nich lze řešit.

Tato práce si klade za cíl vytvoření základního přehledu pro budoucí práci s programy modelujícími vodárenské úlohy. U modelovaných příkladů obsahuje také informace, jež je možno použít k osvojení si užívání některých typů analytických řešení, jež programy ARTS a Epanet poskytují.

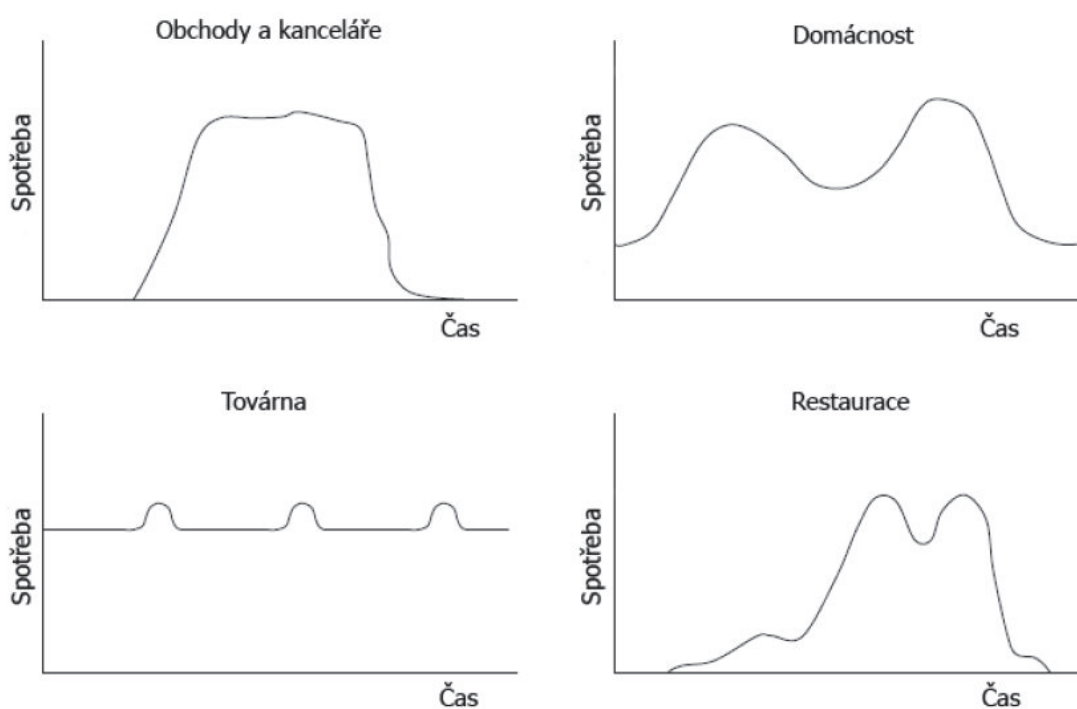
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 TEORETICKÝ ÚVOD A POJMY

V této kapitole jsou přiblíženy teoretické pojmy související s matematickou modelací ve vodárenství. Taktéž jsou zde teoreticky osvětleny některé z jevů, či procesů, které bývají součástí řešení programů zabývajících se řešením hydraulických, nebo kvalitativních simulací na vodovodních sítích.

2.1.1 Spotřeba vody

Jedná se o pojem, jenž popisuje množství vody odebrané ze sítě spotřebitelem. Tato spotřeba vody se v různých místech, zemích, ročních obdobích i denních hodinách liší. Spotřebu pitné vody můžeme rozdělit podle typických skupin spotřebitelů, kdy každá tato skupina má svůj charakteristický průběh spotřeby vody v konkrétní denní hodině. Tato spotřeba může být znázorněna grafy, z nichž některé jsou zobrazeny na obr.1. Denní spotřebu různých skupin spotřebitelů je třeba znát pro návrh vodovodní sítě a její následnou hydraulickou a posléze též kvalitativní analýzu.



Obr.1 Některé z typických denních křivek spotřeb vody pro různé druhy odběratelů [1]

2.1.2 Analýza průtoků v trubních tlakových sítích

Analýza průtoků v trubních tlakových sítích slouží ke stanovení základních hydraulických veličin (průtok, rychlost, tlaková ztráta atd.) v jednotlivých prvcích sítě, která je charakterizována svojí topologií a fyzikálními parametry.

Analýza průtoků může být:

a) **Statická** – pro konkrétní okamžitý zatěžovací stav odběrů na síti, který je pro daný časový úsek neměnný (ustálené proudění).

b) **Kvazi-dynamická** – řeší posloupnost statických analýz pro určitý počet časových intervalů. Ke změně zatěžovacích stavů odběrů a dalších fyzikálních parametrů (např. kóty hladin) dochází pouze na rozhraní jednotlivých časových intervalů. Posuzovaný časový úsek je zpravidla delší (den, týden) a časové intervaly mají obvykle stejnou délku (např. hodina).

c) **Dynamická** – řeší relativně krátké časové úseky s velmi krátkým intervalem (sekundy) změny průtokových a tlakových poměrů. Využívá se např. při hydraulické analýze vodního rázu (neustálené proudění). [0]

2.1.3 Chemické reakce v rozvodech vodovodní sítě

Ve vodě nedochází k bouřlivým chemickým reakcím. Voda je při svém proudění vodovodní sítí oddělena stěnami potrubí od vnějšího prostředí, aby nedošlo k zásadnímu ovlivnění její kvality, tedy znečištění. K výraznějším chemickým změnám může docházet až na základě změny podmínek v trubním systému způsobenými většinou vnějšími podněty při havárii na této síti, nebo s věkem a opotřebením systému vodovodní sítě. Například prudší změny chemických parametrů (koncentrace desinfekčního činidla) mohou způsobit kolonie mikroorganismů, jež se mohou nacházet v silně inkrustovaných rozvodných řadech a mohou významnou měrou snižovat koncentrace desinfekčních činidel rozpuštěných ve vodě.

Nejčastěji sledovanými chemickými parametry ve vodě je změna koncentrace chemických látek v ní obsažených. Jedná se především o látky použité při desinfekci vody na úpravně, či při doúpravě na vodojemech a také látky, jež se uvolnily chemickými reakcemi z vnitřních stěn vodovodního potrubí. Chemické reakce tedy při proudění vody vodovodní sítí probíhají jak v samotné kapalině tak také mezi kapalinou a stěnou potrubí.

Desinfekční látky při průtoku vodovodní sítí reagují a snižuje se jejich koncentrace. Naopak vlivem reakcí desinfekčních činidel na bázi chloru se stěnami kovových potrubí může docházet ke zvýšení koncentrace železa. Dříve se pro výstavbu vodovodních sítí užívaly také azbestocementová potrubí, ale v důsledku uvolňování azbestu z jejich struktur a jeho škodlivého vlivu na zdraví (azbest se řadí mezi látky s karcinogenními účinky) se od konce 80. let 20. století použití těchto trub nedoporučuje. [0]

2.1.4 Matematický model

Model je matematický popis řešeného systému, úpravny vody, vodovodní sítě, její části nebo jednotlivých komponentů. Kvalita modelu se odvíjí od podobnosti modelu s předlohou a to na základě předem definovaných kritérií. Samotné posuzování, zda model dostatečně a za všech okolností odpovídá svému vzoru, je velmi náročné určit. Převážná většina modelovaných jevů je natolik složitá, že je nezbytné je zjednodušit. Proudění kapalin totiž patří obecně mezi jeden z nejsložitějších matematicky popsatelných fyzikálních jevů. V hydraulickém modelu, který má pouze za úkol popsat směr objemového průtoku média je aplikována základní fyzika – hydraulika. Pro kvalitní modelování kvality vody a jejího stárí je však již nutno využít také znalosti o proudění a mísení kapalin spolu se znalostmi o průběhu chemických reakcí odehrávajících se ve vodě. [10]

2.1.5 Matematické modelování

Modelování distribučních soustav, úpraven vody i jednotlivých procesů na vodovodní síti má mnoho důvodů a ty se v průběhu let, kdy je modelování díky vyspělé výpočetní technice proveditelné, měnily.

Konkrétně modely distribučních soustav se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupina je určena ke vhodnému návrhu budoucích distribučních soustav a případně k rozšiřování stávajících. Jedná se o modely, které představují neexistující sítě a podle kterých jsou komponenty při výstavbě dimenzovány. Tomuto typu modelování se v této práci věnovat nebudeme. Druhou skupinou modelů je reprezentace stávajících sítí. Účelů pro vytváření druhého typu modelů je mnoho. Jedním z velkých problémů distribučních sítí je ztráta vody během transportu v potrubí. Pomocí modelů v kombinaci s měřeními na reálném systému je možné detekovat, kde k těmto únikům dochází. Tento typ modelů je také vhodný pro testování různých druhů scénářů, které mohou nastat při opravách vodojemů či potrubí, odstávkách zdrojů nebo úpraven pitné vody a např. i živelných katastrofách. Při aplikaci scénářů na model je možné sledovat stav vody a tlaku v celé síti stejně jako její stárí a chemismus. Získané údaje lze vyhodnotit a případně reálný systém hardwarově či softwarově upravit tak, aby lépe reagoval na připravované i nečekané změny. Model může také informovat operátory o neměřených či neměřitelných veličinách v systému. Návrh řídicího systému pro distribuční soustavy vyžaduje model, na kterém je možno regulaci navrhnout a vyladit, čemuž se bude věnovat kapitola 3. [10]

2.1.6 Vodní ráz

Vzniká při manipulaci s uzavěří, při náhlých změnách průtoků v tlakových potrubích i některých gravitačních přivaděčích, či při přerušení dodávky elektrického proudu a tím způsobenému výpadku činnosti čerpadla. Jedná se o rázové vlny v potrubí, které vlastně jsou tlakovými kmity a projevují se v určitém rozsahu u všech tlakových potrubí. V některých případech jsou tyto tlakové kmity neškodné, v jiných případech mohou dát impuls k poškození potrubí, nebo strojního zařízení.

Rychlost šíření rázové vlny, neboli její postupová rychlost, se vypočítá na základě vztahu (1)

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \left(\frac{1}{E_v} + \frac{d}{E_p \cdot e} \right)}} \quad (1)$$

kde

- ρ ... měrná hmotnost vody [kg/m³]
 e ... tloušťka stěny potrubí [m]
 E_v ... modul objemové pružnosti vody (2,7·10⁹ [Pa])
 d ... průměr potrubí [m]
 E_p ... modul pružnosti materiálu [Pa]

Přírutek tlakové výšky se určí podle vztahu 2.

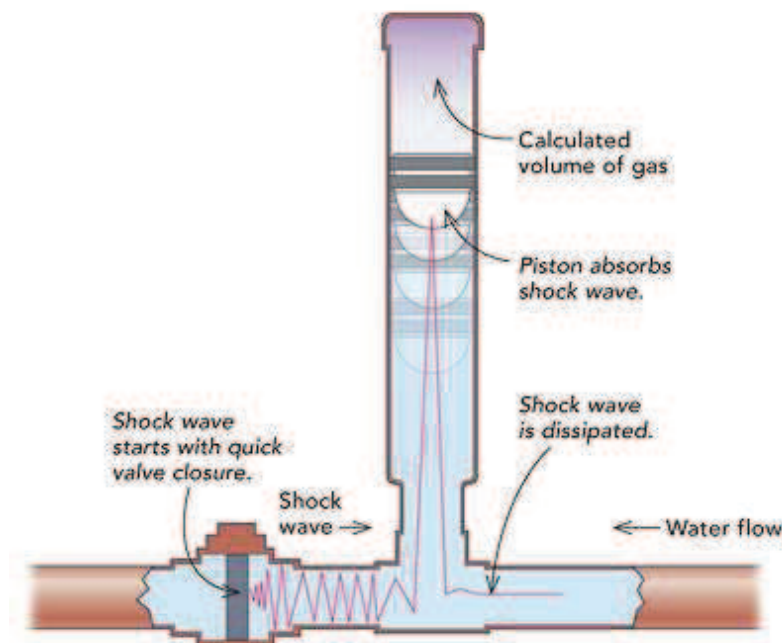
$$\Delta p = \frac{\rho \cdot v \cdot a}{g} = \frac{v \cdot a}{g} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

kde

- v ... průtočná rychlost [m/s]
 a ... postupová rychlost [m/s]
 g ... tíhové zrychlení [m/s²]

Ochrana potrubí proti vodním rázům se navrhuje pro každý případ individuálně pro každou skupinu výtlačného potrubí je vhodný určitý způsob ochrany. Ochrana se může provádět následujícími způsoby, nebo vhodnými kombinacemi:

- zvětšením setrvačných hmot čerpadla
- umístěním expanzní nádoby nebo poruchového redukčního ventilu, či polopneumatického vzdušníku a dalších zařízení. [0]



Obr.2 Schéma funkce expanzní nádoby při výskytu vodního rázu [14]

2.2 PROGRAMY ZABÝVAJÍCÍ SE MATEMATICKÝM MODELOVÁNÍM VE VODÁRENSTVÍ

V této kapitole bylo vybráno ke stručnému popisu několik konkrétních aplikací, jejichž náplní je matematické modelování vodárenských jevů, sítí a řešení problémů. V zásadě by se tyto programy daly rozdělit na dva typy.

Jeden typ programů je typický řešením hydraulické analýzy vodovodní sítě. Pilířem většiny známých programů tohoto zaměření je program Epanet, na jehož výpočetním jádru jsou mnohé další programy postaveny. Je tomu tak z důvodu toho, že je Epanet k dispozici na internetové síti ke stažení a užívání.

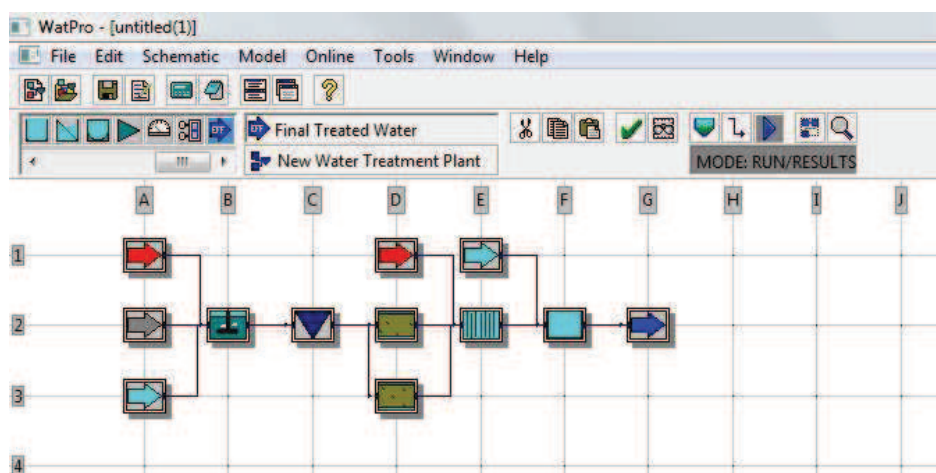
Druhý typ programů se zabývá modelací mnohých jiných procesů a jevů ve vodárenství, jako může být například z pohledu řešení kvality vody využití desinfekce v úpravněnskému procesu, či z pohledu řešení hydraulických úloh analýza vodního rázu ve výtlačných řadech.

Oba typy programů jsou v této kapitole zastoupeny. Jsou z nich vybrány dva reprezentativní programy, kterým se podrobněji věnuji v kapitole 2.3. – program ARTS a v kapitole 2.4. program Epanet. V obou programech jsem vypracoval modelové úlohy.

2.2.1 WATPRO

WatPro je software, který vznikl pod rukama odborníků z firmy Hydromantis. Jedná se o přední simulátor úpravy vody sloužící k určení kvality vody na základě specifických čistících procesů a chemických přísad (jako např. chlorid železitý, hydroxid sodný, vápno). Počítá s parametry kvality surové vody, jako jsou pH, koncentrace organických látek ve vodě – TOC (Total Organic Carbon), nebo specifickou absorbanci UV záření – SUVA (specific ultraviolet absorption) a následně navrhuje provozní parametry jednotlivých objektů na úpravně vody tak, aby bylo možno simulovat provoz celého zařízení.

Má uživatelsky přátelské rozhraní, které umožňuje jednoduše nakonfigurovat schéma úpravní vody během několika minut. Výsledky lze jednoduše zobrazit v okně, či přímo vytisknout a samozřejmě ukládat k pozdějšímu dalšímu zpracování. Je tak návodný a snadný, že byl přijat jako učební pomůcka na univerzitách v Kanadě a Anglii.



Obr.3 Schéma úpravní vody v programu WATPRO a logo programu WATPRO [2]

2.2.2 SEWER+

Jedná se o slovinskou aplikaci sloužící k návrhu venkovních potrubních sítí, jako jsou kanalizace, vodovody, plynovody a elektrická vedení. Umožňuje navrhovat potrubí v polohopisu i podélném řezu, dále hydrotechnické výpočty, výpočty modelu terénu, kubatur atd. Program je přeložen do českého jazyka, stejně jako nápověda, normy, způsoby výpočtů a katalogy výrobců. Umožňuje provádět mnoho užitečných činností počínaje tvorbou podélných profilů až po hydrotechnický výpočet vodovodní sítě, při kterém je využito Epanetu.

Sewer+ je nadstavba pro CAD programy jako AutoCAD Map 3D a AutoCAD Civil 3D. Jedná se o komplexní řešení pro návrh potrubí nad AutoCADem. [3]

2.2.3 WINPLAN

WINPLAN je vůbec první systém programů pro projektování vodovodů a kanalizací pracující v češtině v prostředí Windows. Jedná se o softwarový balíček firmy Hydroprojekt, jehož cílem je usnadnit a zefektivnit práci při projektování. Svým zpracováním i obsahem je zaměřen zejména pro projektanty vodohospodářských konstrukcí za účelem navrhování a posuzování kanalizací a vodovodních systémů. Velkou výhodou systému je možnost využití jednotlivých modulů buď samostatně, nebo v podobě propojeného systému. [4]

Mezi hlavní programy využitelné ve vodárenské praxi patří především:

1. TRASA
2. VYTILA
3. Podélný profil vodovodu
4. Kladečské schéma vodovodu

Z hlediska matematického modelování lze pro tuto práci využít pouze program VYTILA, neboť ostatní z výše zmíněných programů sice slouží efektivně v praxi, ale pouze ve formě zpracování výstupu již vyřešených úloh.

VYTILA

Tento modul slouží k podrobnému hydraulickému výpočtu ustáleného proudění v hydraulicky krátkém vodovodním potrubí, jehož součástí mohou být prvky a armatury.

Program VYTILA na základě zadaných okrajových podmínek a hydraulických charakteristik prvků spočítá průtok a průběh tlakové čáry v potrubí. Uživatel si může navolit zavírání uzávěru s tím, že se postupně počítají jednotlivé posuzované stavy. Tímto způsobem uživatel zjistí provozní stavy v požadovaném rozsahu parametrů.

Program je 16-bitový, čímž je umožněno jeho spuštění jak v operačním systému Windows 3.1, tak ve Windows 9X a Windows NT.

Zadávání i následná úprava vstupních parametrů objektů probíhají v jednotlivých dialogových oknech. Proto tento systém nese přívlastek stavebnicový. V zásadě je nutné provést určení

průtoku a tlaku v systému na jeho vtoku či výtoku, dále je třeba zadat alespoň jeden prvek (tvarovku) počítaného úseku.

Hlavním grafickým výstupem je podélný profil potrubí s průběhem tlakové čáry. Uživatel tak získá informaci o průtoku, jež může v důsledku přítoků, resp. odběrů, po délce potrubí měnit a o ztrátových výškách na jednotlivých prvcích.

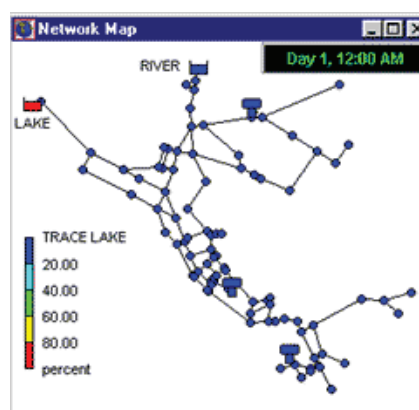
Veškeré výsledky a sestavu prvků včetně jejich parametrů lze zapisovat na disk ve formátu *.DBF. Kromě grafických výstupů je možné tisknout sestavu prvků včetně jejich parametrů, průběh tlakové čáry a podle zadaných okrajových podmínek i závislost průtoku na tlakové výšce na vtoku, resp. výtoku ze systému.

2.2.4 EPANET

Byl vyvinut vládou agenturou EPA Spojených států amerických, oddělením vodovodů a vodních zdrojů. Je to software, který modeluje rozvody vody potrubními systémy. Jedná se o program kompatibilní s Windows 95/98/NT/XP, který provádí statickou a dynamickou analýzu hydrauliky a kvality vody uvnitř trubní tlakové sítě.

Tlakové trubní sítě se v Epanetu skládají z úseků trubek, uzlů, čerpadel, ventilů a nádrží a vodojemů. EPANET sleduje průtok vody na jednotlivých potrubích, tlak na každém uzlu, výšku vody v každé nádrži, koncentrace chemických látek v celé síti během simulačního období. Simulovány může být také trasování miniaturní částice nebo stáří vody při průchodu vodovodní sítě.

Poskytuje integrované počítačové prostředí pro editaci vstupních dat, průběh simulací hydrauliky a kvality vody a zobrazování výsledků v nejrůznějších formátech. Mezi tyto formáty patří barevně rozlišené mapy sítí, tabulky dat, grafy a vrstevnicové grafy. Podrobněji se tomuto programu budeme věnovat v kapitole 2.4, včetně modelu matematické analýzy stáří vody ve vodovodní síti.



Obr.4 Ukázka schématu vodovodní sítě v Epanetu a logo agentury EPA [5]

2.2.5 AutoPEN

Za Autopenem stojí pan Ing. Lubomír Bucek z Liberce, který vytvořil obdobný balíček softwarových aplikací, jako to provedla společnost Hydroprojekt s WINPLANEM. Je na uživateli samotném, aby zvolil, zdali mu vyhovuje spíše práce v AutoPENu, či WINPLANu.

Zjevný rozdíl při práci s programy WINPLAN a AutoPEN je především ve způsobu vkládání vstupních dat. Zatímco WINPLAN používá pro jednotlivé objekty jednotlivá dialogová okna tento systém práce nazývá stavebnicovým, vkládání parametrů v programech AutoPENu probíhá v přehledných dialogových tabulkách. Způsob práce s AutoPENem na základě zkušenosti hodnotím jako uživatelsky příhodnější, avšak záleží na „síle zvyku“ a zažitosti konkrétního modulu či programu. V obou lze provádět efektivní práci.

AutoPEN spolupracuje s těmito programy:

- AutoCAD LT
- DesignCAD
- Bentley Microstation
- Briscad
- ProgeCAD
- ZWCAD
- DraftSight
- 4MCAD

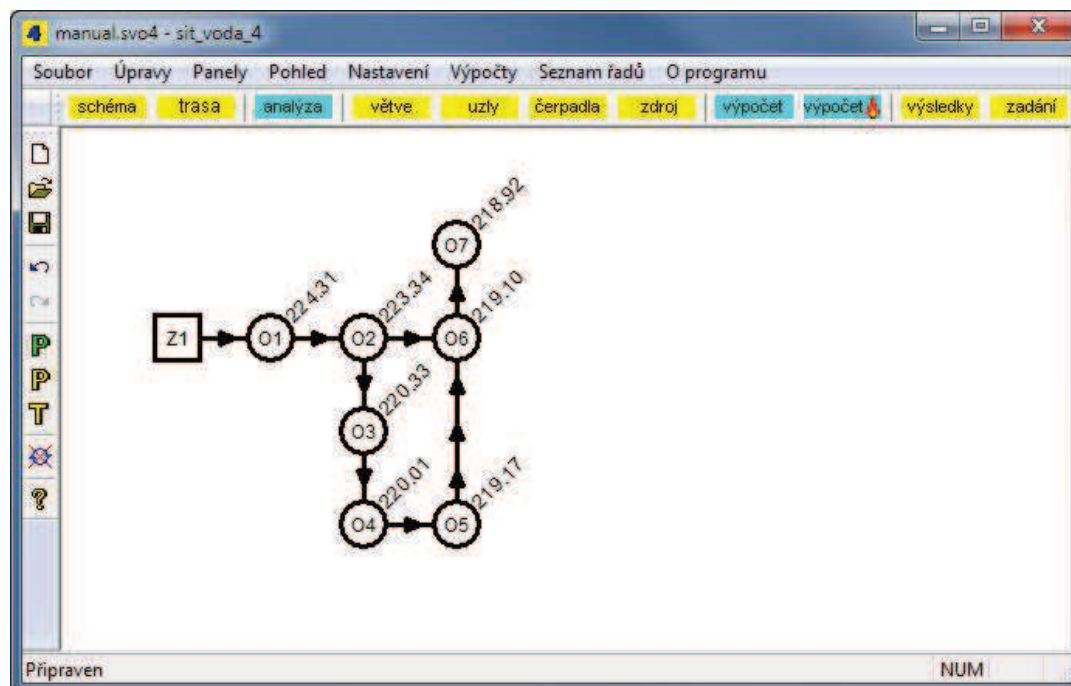
Z hlediska využití ve vodárenství lze z AutoPENu využít následující programy:

- Podélný profil, voda
- Kubatury voda
- Přehledný podélný profil voda
- Kladečské plány
- Výpočet vodovodní sítě

Poslední jmenovaný program svým zaměřením zasahuje do tématu této práce. **Výpočet vodovodní sítě** je určen k dimenzování potrubí vodovodního řadu. Program řeší jak sítě větvené, tak i okružové. Velikost schématu je omezena na 3300 uzlů a 6600 větví – úseků.

Vlastní výpočet dimenzí, tlaků a ztrát lze provést podle Mannigových nebo Ševelevových vzorců. K vyvažování okruhů je použita Lobačev - Crossova iterační metoda. Výsledky výpočtů i zadání zobrazí program v přehledných formulářích. Formuláře je možno tisknout nebo ukládat do souborů ve formátu RTF pro následné zpracování textovým editorem (např. Word). [6]

AutoPEN



Obr.5 Ukázka pracovní plochy aplikace Výpočet vodovodní sítě a logo AutoPEN [6]

2.2.6 ARTS – hydraulic software design

ARTS - hydraulic software design (dále jen ARTS) je software určený k provádění hydraulické analýzy a návrhům objektů. Splňuje analytické potřeby pro vodohospodářské inženýry. Ve svém záběru zahrnuje řešení ustáleného průtoku vody, vzduchu a kalů jednotlivými potrubími a tlakovými sítěmi, říčního i bystřinného proudění v otevřených žlebech, vodního rázu ve výtlačném potrubí, hydraulické návrhy jednotlivých objektů i soustav na ČOV.

Grafické rozhraní ARTS je intuitivně jednoduché a uživatelsky příjemné. Umožňuje uživatelům využívat náčrtů schémat řešených objektů a soustav. ARTS je výkonným analytickým nástrojem pro hydraulický návrh vodohospodářských staveb. Více o programu ARTS v kapitole 2.3.

2.2.7 HydraulCAD

HydraulCAD je program, který je vyvinut firmou Autodesk pro prostředí Windows a lze v něm simulovat statickou a kvazi – dynamickou analýzu hydraulických poměrů v tlakové trubní síti. Tato síť v HydraulCADu sestává z obvyklých prvků, jimiž úseky, uzly, výtoky, čerpadla, ventily, vodojemy a nádrže.

Díky využití matematického modulu Epanetu je možno sledovat:

- průtoky na úsecích

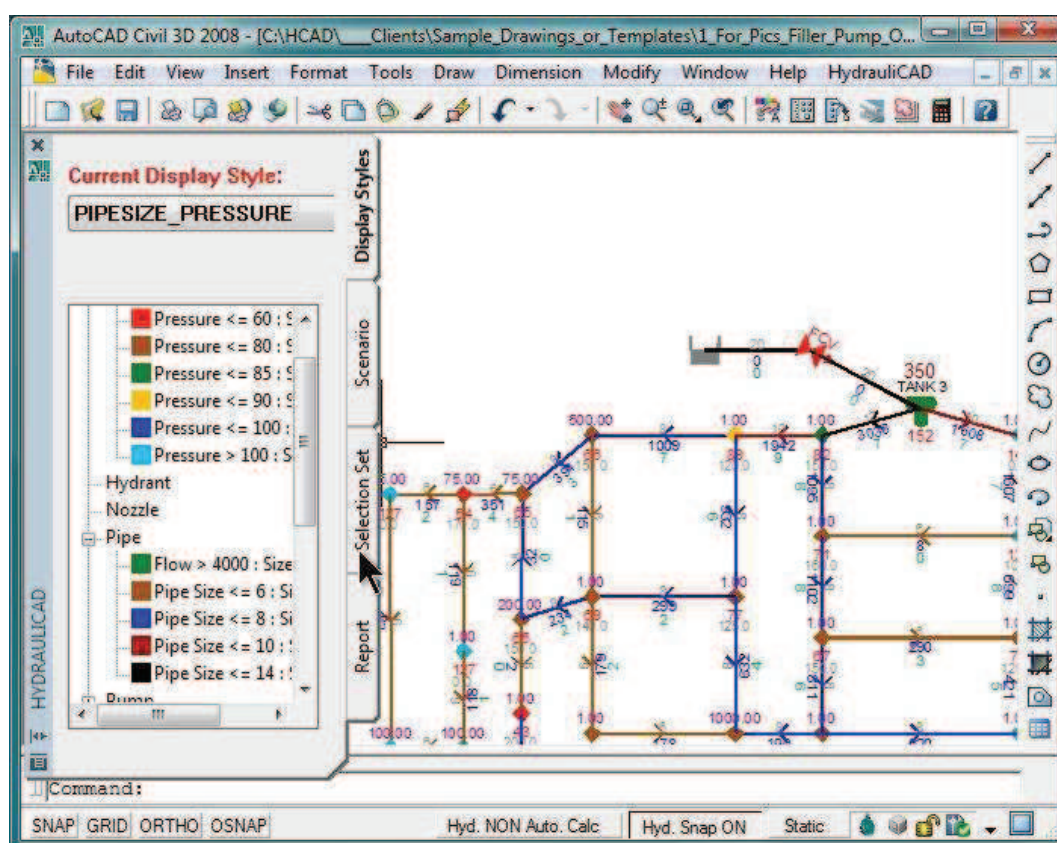
- tlaky v uzlech
- výšky hladin ve vodojemech

a tak získat výstupy potřebné pro proces návrhu vodovodní sítě.

Poskytuje integrované prostředí pro tvorbu sítě, vkládání jejich parametrů i zobrazení výstupních výsledků analýz.

Pro využití HydraulCADu je třeba vlastnit optimálně některý z programů AutoCAD 2004 – 2009 Civil 3D, Civil Series, či běžný AutoCAD.

Systémové požadavky jsou na RAM paměť specifikovány pro práci s HydraulCADem ve Windows XP 1GB a vyšší pro Windows Vista alespoň 2GB RAM a vyšší.



Obr.6 Ukázka pracovní plochy HydraulCADu [8]

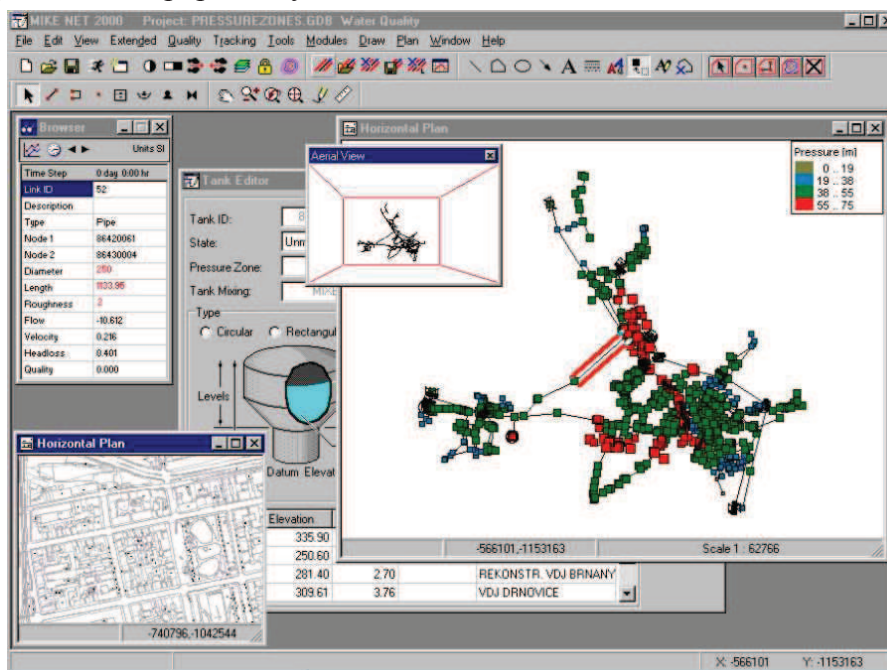
2.2.8 MIKE NET

Práce v programu MIKE NET je v mnohých ohledech podobná programu, na němž je MIKE NET postaven, tedy Epanetu. V současnosti patří do softwarového sortimentu firmy DHI a.s..

Umožňuje vkládat obrazové podklady do pozadí, provádí statické i kvazi - dynamické hydraulické analýzy za použití vzorců Chézy - Manning, Darcy - Weisbach, Hazen – Williams. Také provádí analýzy kvalitativních parametrů vody v síti. Kromě sledování koncentrací rozpuštěných látek (např. desinfekce, THM – trihalogenmethany, Fluor), stáří vody, či pohybu částice v síti sleduje navíc třeba tvrdost vody v síti.

Umožňuje provést na jednom schématu sítě více analýz zároveň a následně je spolu porovnat. Spolupracuje také s programy GIS jako jsou například MapInfo, či ARC/INFO.

MIKE NET je program, k jehož spuštění postačuje instalace na některý z Windows 95, 98, NT, 2000. Nelze s ním operovat s systémech Windows 3.1. a Windows 3.11 či v MS_DOS. Vzhledem k aktualizovanosti oproti Epanetu, je MIKE NET určitě sofistikovanější řešení při hledání analytického nástroje pro modelování ve vodárenství než Epanet samotný. Pro Epanet však hovoří možnost jeho bezplatného stáhnutí, zatímco všechny ostatní programy jsou v jejich plných verzích zpoplatněny.



Obr.7 Ukázka pracovní plochy MIKE NET [9]

2.3 PROGRAM ARTS – HYDRAULIC SOFTWARE DESIGN

2.3.1 Seznámení

Tento program pochází od irské firmy Aquavarra, kterou založil roku 1996 profesor Tom Casey. Stejně jako všechny ostatní, jež jsou součástí této práce, byl vyvinut, aby vyhověl potřebám vodohospodářských inženýrů. Svým rozsahem zabírá množství situací, se kterými se může projektant vodohospodářských staveb setkat. Jak z pohledu řešení problémů týkajících se vodovodních sítí, tak také z pohledu hydraulického řešení čistíren odpadních vod, či jejich samostatných objektů (nikoli technologické řešení). ARTS se jeví v obou případech jako velmi užitečný.

2.3.2 Systémové požadavky

Každý z programů má své nároky na úroveň vybavení počítače, na němž má fungovat. V případě ARTS jsou překvapivě nízké, a začínají na CPU 486 a 16Mb paměti RAM. Zahrnují také verzi Windows 95 a vyšší a tímto systémem podporovanou tiskárnu k realizaci výstupu v papírové formě. Nároky na dnešní dobu opravdu zarážející. Myslím si však, že to může být způsobeno jistou neaktuálností manuálu, který je datován k roku 2001. Odhadoval bych tedy, že program nyní může mít vyšší nároky, přestože demoverze, kterou jsem mohl použít po omezenou dobu 30ti dní fungovala nejvýše na Windows XP. Pro Windows 7 bohužel nebylo možné demoprogram plně nainstalovat a použít.

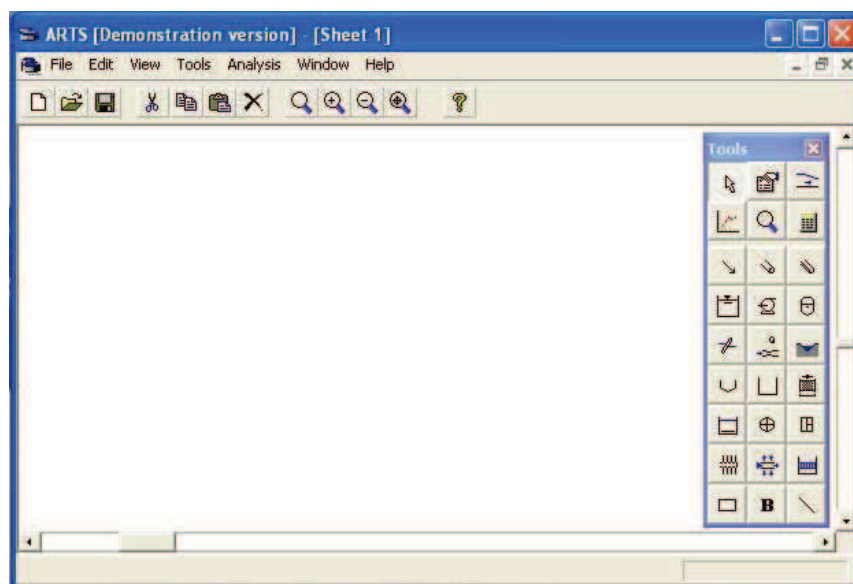
2.3.3 Prostředí ARTS

Aplikace pracuje v uživatelsky přijatelně řešeném a jednoduchém prostředí, které každému projektantovi s praxí v programech jako jsou AutoCAD, či Bentley Microstation přijde povědomě návodné.

Po spuštění programu se zobrazí jeho hlavní okno s panelem hlavní nabídky a dvě podokna. Jedno je návrhovým oknem určeným k tvorbě grafického schématu, druhé podokno obsahuje panel nástrojů.

S návrhovým oknem je možno manipulovat na základě zvyklostí práce ve Windows.

Okno panel nástrojů nese „plovoucí“ funkci, kdy je vždy nejsvrchnější vrstvou a je možno jej posunout kdekoli po obrazovce i mimo okno aplikace ARTS. Na panelu nástrojů se nachází tlačítka s různými funkcemi kreslení, či příkazu. V prvním a druhém řádku jsou tlačítka příkazová (výběr, vlastnosti, GVF, zobrazit graf, zoom, kalkulátor potrubí/ žlabu). Ve třetím řádku jsou spojovací prvky (potrubí a žlab) a také tlačítko pro zakreslení odběru/vtoku. Dále následují již samotné vodárenské objekty – nádrž (zdroj), čerpadlo, expanzní nádoba, pod nimi se nachází čistírenské objekty: česle, měrný žlab, měrný přeliv, sedimentační nádrž, aktivační nádrž, biofiltr, lapák písku, rozdělovací komora, odlehčovací komora. Na posledním řádku palety panelu nástrojů jsou grafické příkazy, kterými jde vkládat do návrhového okna text, kreslit úsečky a vytvářet obdélníky.



Obr.8 Ukázka pracovní plochy programu ARTS [7]

2.3.4 Tvorba návrhu

Tvorba návrhu sestává ze dvou základních kroků:

- a) Vytvoření grafického schématu posuzované hydraulické soustavy
- b. Zadání vlastností každému prvku hydraulické soustavy.

a) Tvorba grafického schématu

Probíhá velmi podobně jako v jiných vektorových programech s tím rozdílem, že v ARTS není podstatné měřítko, tedy grafická velikost objektu, či jeho délka v případě spojovacích prvků (koryto, potrubí). Jde o vykreslení grafického schématu řešené hydraulické soustavy.

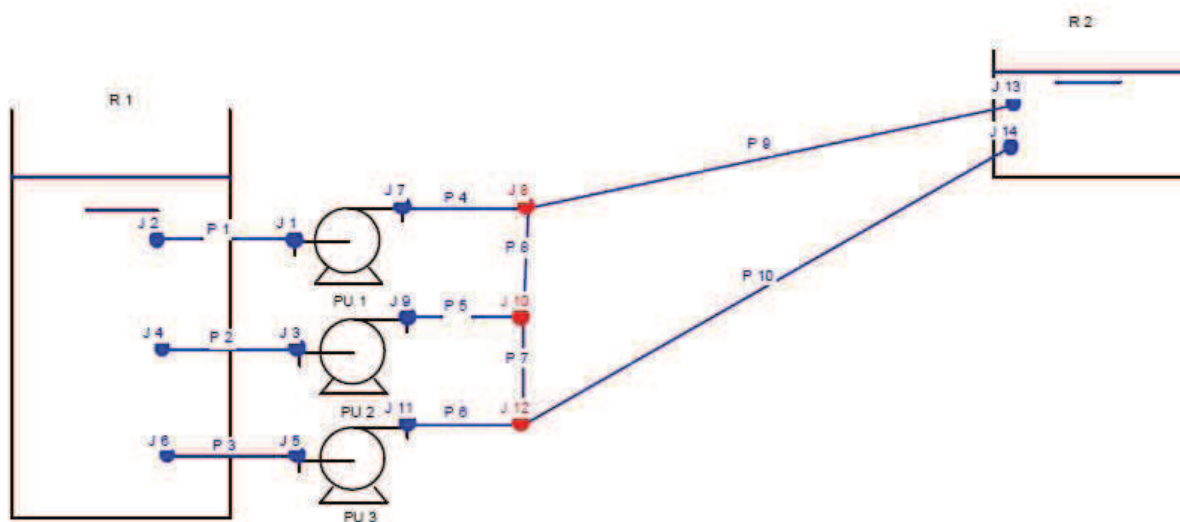
Každý objekt/prvek sestává z grafické značky znázorňující jeho symboliku a tvar. Dále z rohových uchopovacích/manipulačních bodů, jež slouží ke změně grafické velikosti v úhlopříčných směrech (ne však rozměrů a jiných ve vlastnostech nastavitelných parametrů). Posledním typickým prvkem objektu je jeho popis, např. „R1“ v případě nádrže, který je možno změnit v panelu „Vlastnosti“ daného objektu (list STATUS).

Kresba objektu začíná výběrem – jednoduchým poklepem – na konkrétní konstrukci v panelu nástrojů. Značka vybraného objektu se poté umístí kliknutím do návrhového okna a druhým kliknutím se potvrdí jeho velikost.

Po označení objektu příkazem „Výběr“ z panelu nástrojů lze navrhované prvky pomocí zkratkových kombinací kláves kopírovat, vyjmát z návrhu a také je tam opět vkládat (Ctrl+C, Ctrl+X a Ctrl+V), a také klávesou „Delete“ mazat.

Při návrhu hydraulických sestav je vždy nutno umisťovat jejich krajní /uchopovací/ manipulační body tak, aby se překrývaly, případně zasahovaly dovnitř objektů, neboť ke spojení objektu dochází až povelom COMPILE (F2) – SESTAVIT. Po jeho provedení dochází k ověření spojitosti sestavy/soustavy a na styčných bodech se vytvoří plné kroužkové

bodů, které představují uzly. Tyto uzly nesou svoje označení stejně jako jakýkoli jiný objekt návrhu a jsou barevně rozděleny na červené spoje trubek, zelená napojení přítoku/odběru a modré spoje potrubí a objektu. U každého z uzlů se zadává ve vlastnostech jeho nadmořská výška. Správně sestavený systém tedy ověříme kontrolou vytvoření uzlů odpovídajících barev.



Obr.9 Ukázka schématu paralelního zapojení soustavy čerpadel [7]

b) Zadání vlastností každému prvku hydraulické soustavy.

Každý hydraulický objekt, který umístíme do návrhu, si sebou nese své vlastnosti. Při vytváření schématu návrhu, nekreslíte regulérní dimenze opravdového objektu, ale nastavíte je spolu s dalšími specifikacemi právě ve „Vlastnostech“. Fyzikální vlastnosti i geometrické parametry mohou být ve „Vlastnostech“ přednastaveny a tak je vždy třeba ověřit jejich platnost a případně opravit. Každá změna musí být potvrzena Enterem, aby došlo k jejímu zaregistrování. Ve „Vlastnostech“ lze měnit také pojmenování objektu.

2.3.5 Hydraulické analýzy / design

Program ARTS má mnoho schopností řešit nejrůznější okruhy hydraulické úlohy, jež pokrývají široké pole působnosti vodohospodářských inženýrů. Jsou to následující:

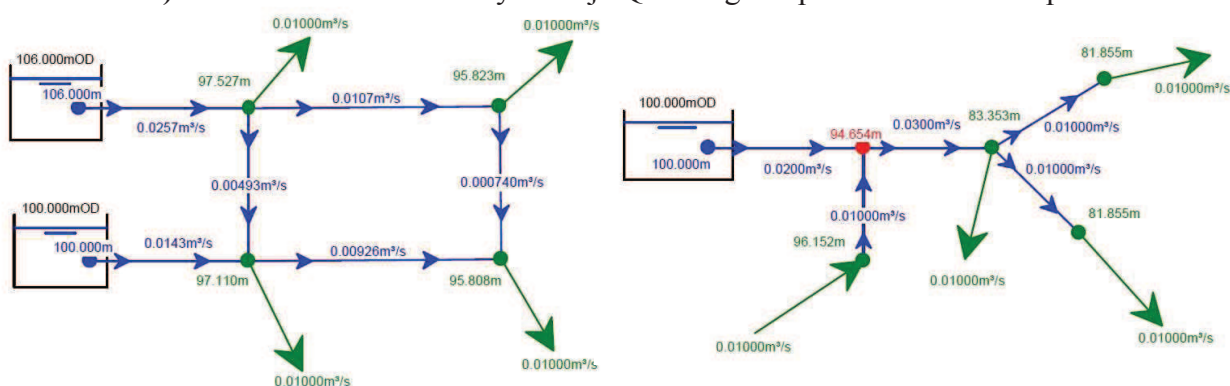
1. Tlakové proudění potrubím
2. Proudění žlabem
3. Proudění přelivy a žlaby určenými k měření průtoku
4. Hydraulický návrh ČOV
5. Analýza kavitačních jevů při čerpání

Je možno provést také hydraulickou analýzu samostatného objektu (list STATUS – „Vlastnosti“), avšak při řešení soustav objektů není vždy možné využít všechny typy analýz.

ad 1. Tlakové proudění potrubím

Návrh potrubí je spojen s principem ustáleného proudění plným profilem. ARTS zná několik způsobů jak řešit výpočty týkající se proudění potrubím:

- A) **STATUS list ve „Vlastnostech“** – tato forma výstupu hydraulických dat zobrazuje rychlost, Reynoldsovo číslo, koeficient tření, tlakové ztráty pro daný průtok v závislosti na vstupních datech vložených do listů „Hlavní“ a „Extra“ v nabídce „Vlastnosti“.
- B) **Kalkulátor potrubí** – dopočítává jednotlivé parametry potrubí, jako funkce ostatních parametrů a aplikovat je pro daný úsek.
- C) **Analýza rovnoměrného proudění** – tento příkaz řeší rozdělení tlakových výšek/tlaku v systému trubních sítí, zahrnujících také čerpadla a nádrže/vodojem, tedy místa s konstantní hladinou.
- D) **Varianta Grafu** – vykresluje Q-H diagram pro konkrétní úsek potrubí



Obr.10 Ukázka hydraulicky vyřešeného schématu okružové (vlevo) a větvené (vpravo) tlakové trubní sítě [7]

ad 2. Proudění žlabem

Vlastností, jež charakterizuje proudění otevřeným korytem, je existence volné hladiny. Ustálené proudění je v konvencích hydraulického názvosloví rozděleno na tři základní typy, s nimiž ARTS pracuje: rovnoměrné, nerovnoměrné: říční, bystřinné.

Proudění lze charakterizovat také sklonem dna koryta:

mírný sklon, tedy: podkritické proudění při Froudově čísle $Fr < 1$

kritický sklon, kritické proudění $Fr = 1$

prudký sklon, superkritické proudění, $Fr > 1$

Jako ve všech projektech řešených v ARTS, je nejprve nutné vytvořit vhodný objekt, tedy koryto, či použít již navržené. Požadované výpočty je možno provést dvěma způsoby:

- listem STATUS ve „Vlastnostech“
- pomocí "Kalkulátoru koryta".

ad 3. Proudění zařízeními určenými k měření průtoku

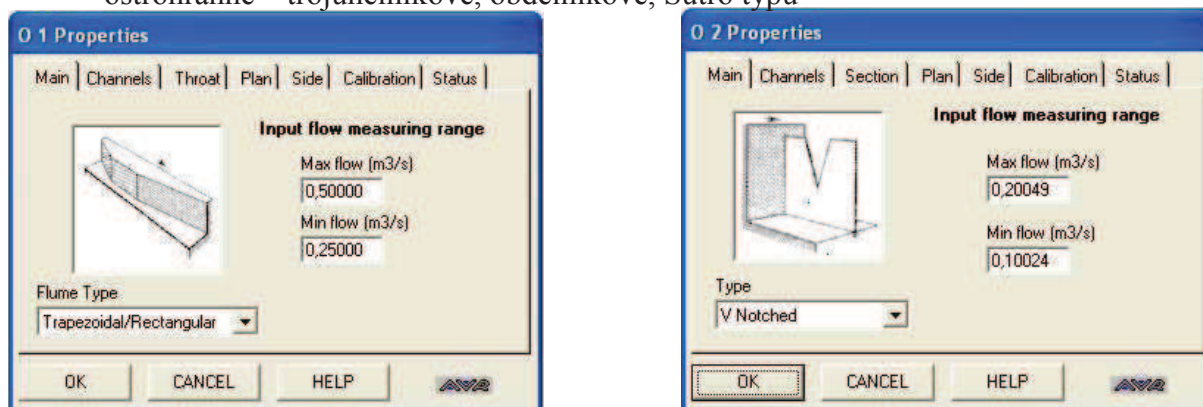
Do těchto řešení spadají různé měrné žlaby a také měrné přelivy:

Měrné žlaby:

- s dlouhým hrdlem obdélníkového, lichoběžníkového, nebo „U“ průřezu
- bez hrdla obdélníkového průřezu
- Parshallův žlab

Přelivy:

- se širokou korunou
- ostrohranné – trojúhelníkové, obdélníkové, Sutro typu



Obr. 11 Ukázka prvního listu panelů „Vlastnosti“ pro žlab (vlevo) a přeliv (vpravo) [7]

Tyto prvky se obvykle navrhují pro určitý rozsah hodnot průtoků a tak i ARTS vede při jednotlivých návrzích projektanta v mezích, které vyplývají z postupně vyplňovaných parametrů ve „Vlastnostech“ tak, aby i tato „podmínka“ byla splněna.

ad 4. Hydraulický návrh ČOV

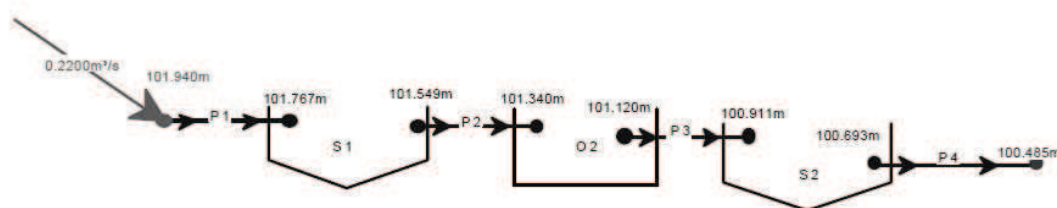
Program ARTS je možno využít k návrhu objektů, jež náleží do procesu čištění odpadních vod na ČOV. Uživatel tedy může provést jak hydraulický návrh samostatných objektů tak samostatných spojovacích prvků. Je možno provést také analýzu relativních výšek jednotlivých objektů tak, aby bylo možno zaručit v zadaném rozsahu průtoků, že půjde o gravitační proudění. ARTS také umí provést analýzu hydraulického profilu celým systémem objektů za jakéhokoli průtoku z mezí maximálního a minimálního průtoku ČOV.

Tlaková ztráta (ztrátová výška) na každém objektu je funkcí průtoku a nastavení geometrických parametrů daného objektu. Právě díky možnosti nastavení optimálních rozměrů objektů je možno ovlivnit ztráty na každém z objektů. Toto probíhá u každého objektu v nastavení jeho „Vlastností“ a je možno to zkontrolovat v listu STATUS ve „Vlastnostech“

S využitím komponentu rozdělovací komory je možno taktéž vytvořit kupříkladu dvě paralelní čistící linky na ČOV, či si udělat několik návrhů ČOV v jednom návrhovém okně a pouze přepínáním rozdělení přítoku v rozdělovací komoře provádět na nich na každé zvlášť analýzy a vyhodnotit si nejvhodnější řešení ČOV.

Systém ČOV zahrnuje tyto hydraulické objekty z panelu nástrojů:

aktivační nádrž
biofiltr
česle
lapák písku
nádrž
potrubí
přeliv
rozdělovací komoru
sedimentační nádrž
žlab



Obr.12 Ukázka vyřešeného hydraulického profilu ČOV (nadm. výšky) [7]

ad 5. Analýza vodního rázu

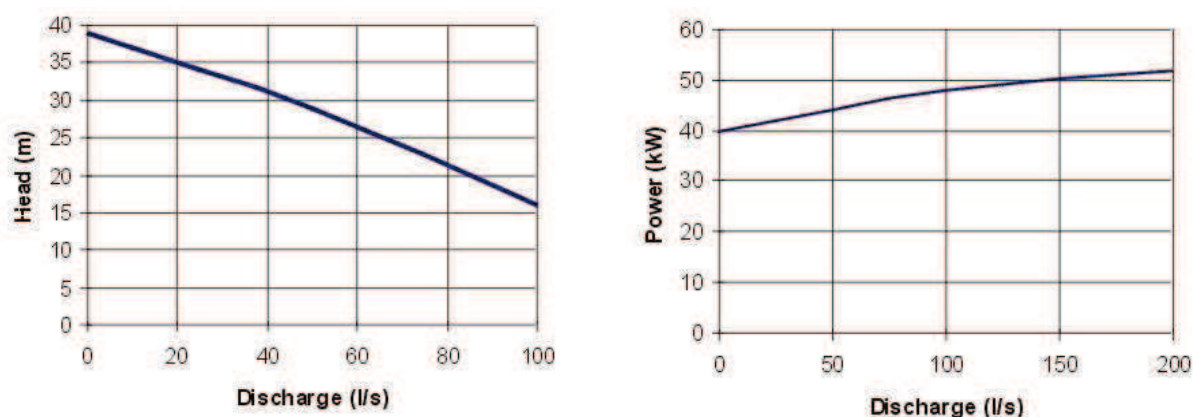
Program ARTS disponuje také řešením této situace. Model čerpadla v této aplikaci představuje čerpací stanici se všemi jejími potrubními rozvody včetně armatur, jako jsou kolena, či šoupátka, jež se nacházejí na sání a na výtlačném řadu z čerpadla. Příkaz "Neustálené proudění" v hlavním panelu provádí analýzu přechodného vodního rázu, který vzniká při náhlém výpadku čerpadla. Této analýze je věnována kapitola 2.3.7.

2.3.6 Práce s programem, tisk, export

ARTS využívá typické a obvyklé metody pro práci s programem ve smyslu, jeho otevírání, ukládání i tisku. Při tisku je možno zvolit, zdali má uživatel zájem o výstup pouze ve formě "tabulek a výpočtů", či o formu grafickou. Je možno zvolit i obě varianty zároveň. Export a kopírování z provedeného řešení se nachází pod nabídkou "View" a "Edit" v hlavním panelu programu.

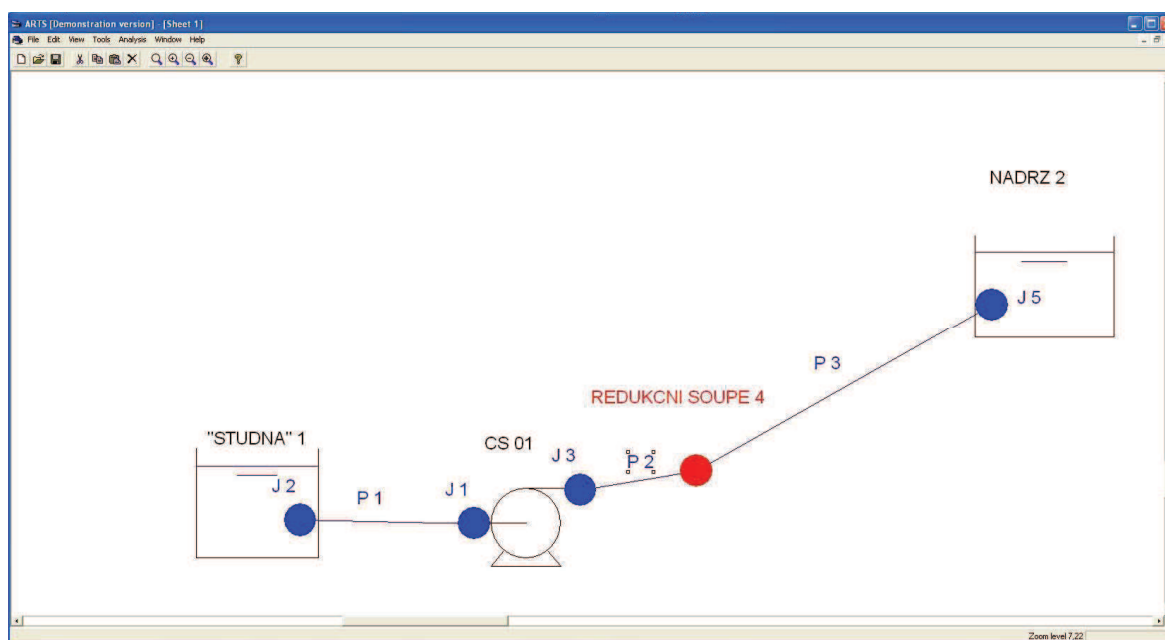
2.3.7 Analýza vodního rázu – modelový příklad

Za modelový příklad v programu ARTS byla zvolena simulace vodního rázu ve výtlačném řadu. Hloubka zdroje před sáním je -2,5 m a výška nádrže, do níž ústí výtlačný řad, je 13m nad povrchem. Samotný výtlačný řad je 1500m dlouhý, DN 350mm se zadaným podélným profilem a tloušťkou stěny potrubí 7,5mm a součinitelem ztrát po délce $k=0,1$. Délka přívodního potrubí na sání čerpadla je 10 m, DN 250 mm, $k=0,01$ a součinitel zahrnující ztráty na tvarovkách a armaturách řadu je $k_{\text{total}}=0,5$. Délka výtlačného řadu po redukční šoupátko je 6m, DN 250, $k=0,01$, $k_{\text{total}}=9,6$. Výška redukčního šoupátka je - 1 m a výška čerpadla -2 m. Čerpadlo je charakterizováno Q-H a Q-P křivkami, počtem otáček $1490 \cdot \text{min}^{-1}$ a momentem setrvačnosti $0,550 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

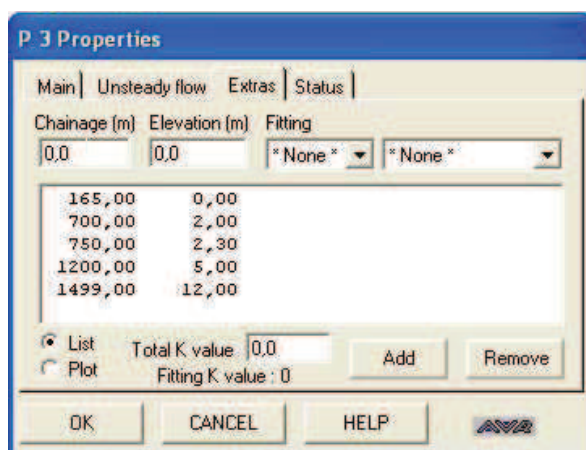


Obr.13 Diagram Q-H a Q-P

V prvním kroku jsem nakreslil do návrhového okna schéma zadané úlohy a doplnil náhodný profil výtlačného řadu.



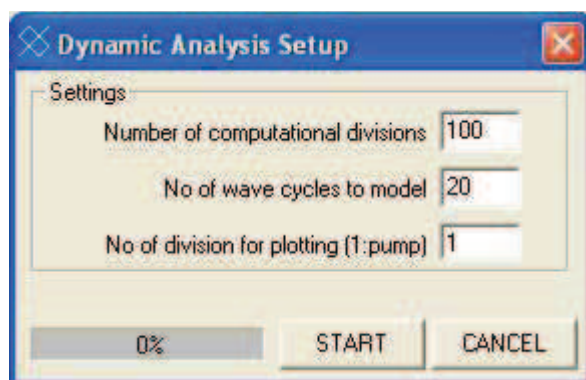
Obr.14 Schéma výtlačného řadu



Obr.15 Zvolený průběh podélného profilu výtlačného řadu

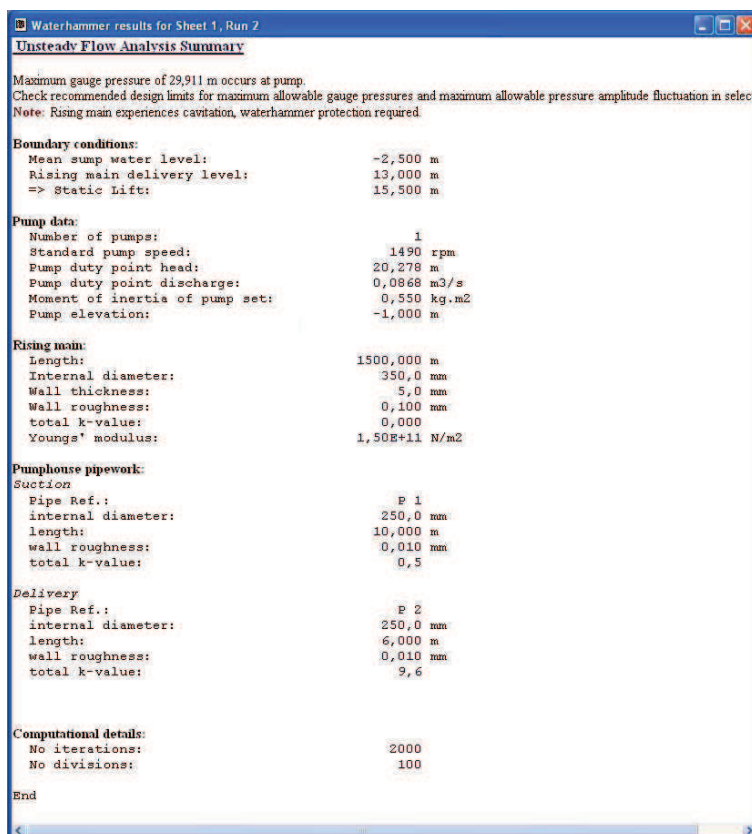
V druhém kroku jsme nastavili požadované vlastnosti jednotlivých objektů.

Ve třetím kroku jsme nastavili parametry dynamické analýzy neustáleného proudění.

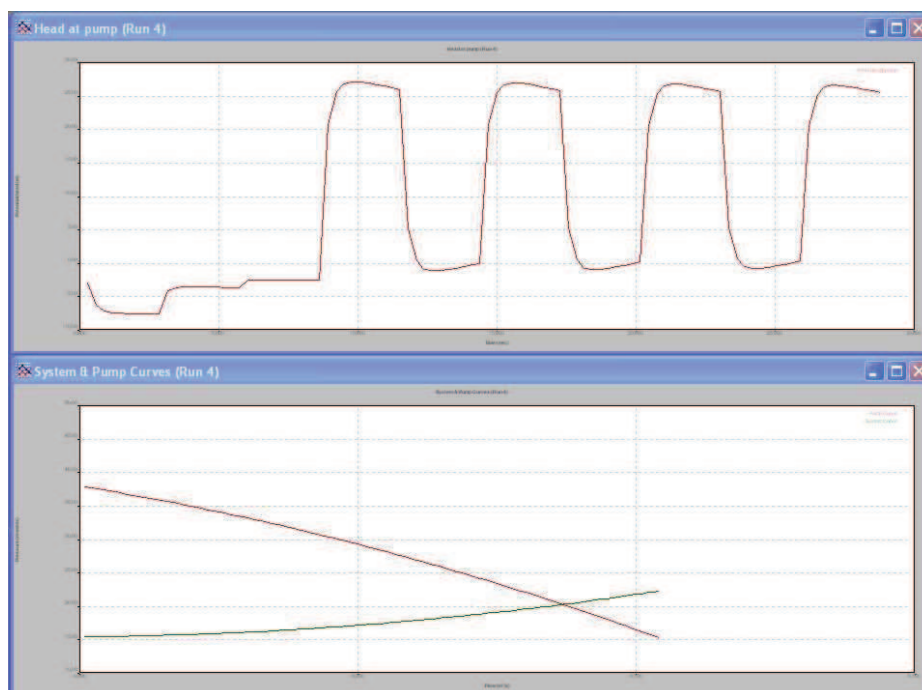


Obr.16 Nastavení parametrů dynamické analýzy neustáleného proudění

Okamžitě po průběhu analýzy se zobrazily formy výstupu: výpis a také grafy. Z nich je zjevný tlakový průběh vodního rázu a také P-Q křivka čerpadla (křivka má klesající tendenci) a výtlačného řadu (křivka velmi pomalu roste).



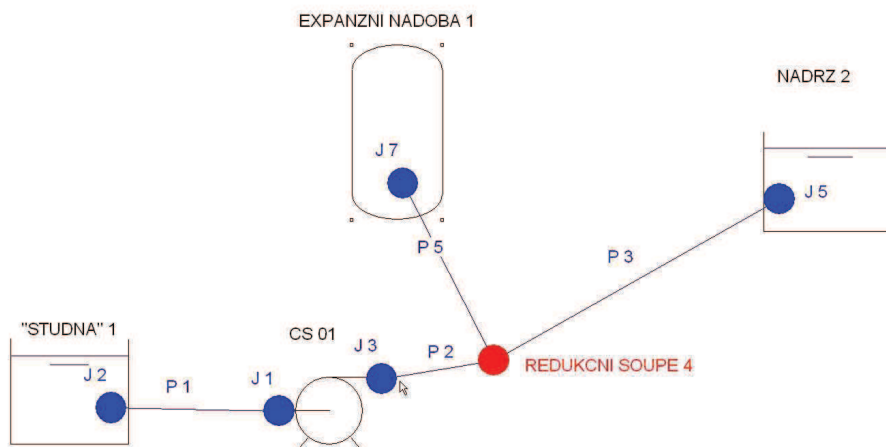
Obr.17 Výstup z analýzy ve formě výpisu



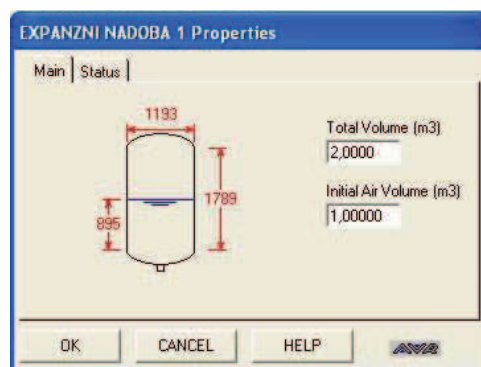
Obr.18 Výstup z analýzy ve formě grafu

V druhé části modelace vodního rázu upravíme jeho účinky tím, že použijeme expanzní nádobu o celkovém objemu $V_{\text{total}}=2\text{m}^3$, objemu vzduchu $V_{\text{vzd}}=1\text{m}^3$ a výškou vodního sloupce 895mm. Tu napojíme do uzlu číslo 4 potrubím o parametrech $l=10\text{m}$, DN 100 mm, $k=0,01$, $k_{\text{total}}=1,50$. Uzel číslo 6 nacházející se v expanzní nádobě bude ve výšce – 1 m.

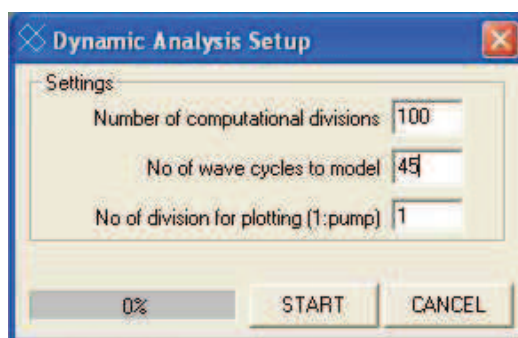
Postup je stejný jako v předchozím případě – zakreslíme Expanzní nádobu a přívod k ní a následně nastavíme jejich vlastnosti. Poté provedeme analýzu tentokrát však s delším opakováním, aby došlo k zakreslení celého grafu průběhu vodního rázu, jehož tlakové účinky byly potlačeny expanzní nádobou.



Obr.19 Schéma výtlačného řadu s expanzní nádobou

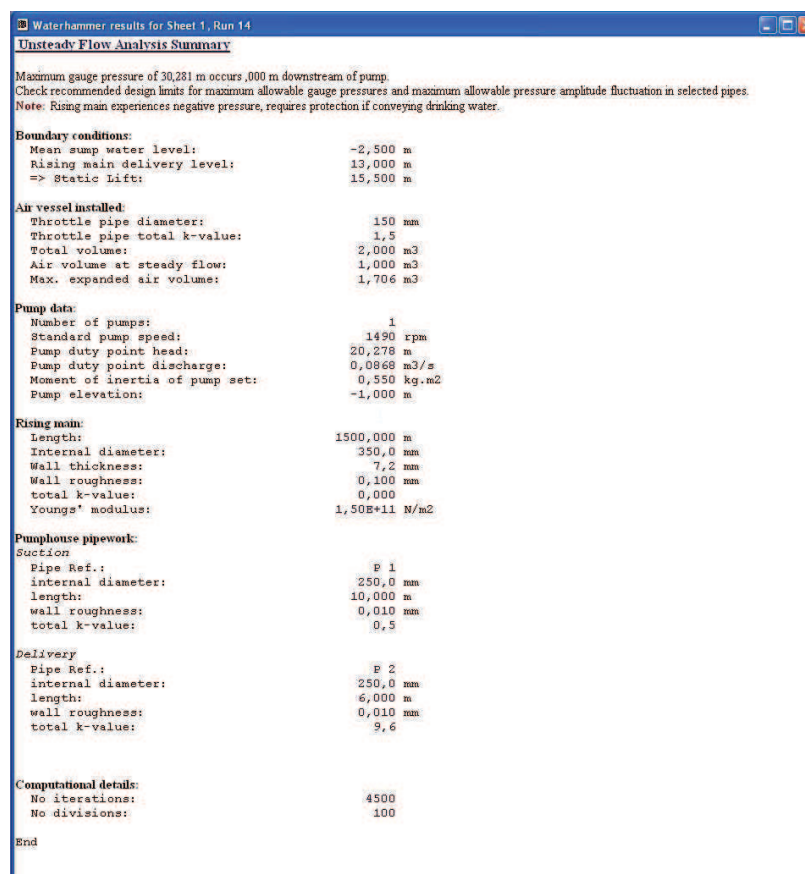


Obr.20 Nastavení „Vlastností“ expanzní nádoby

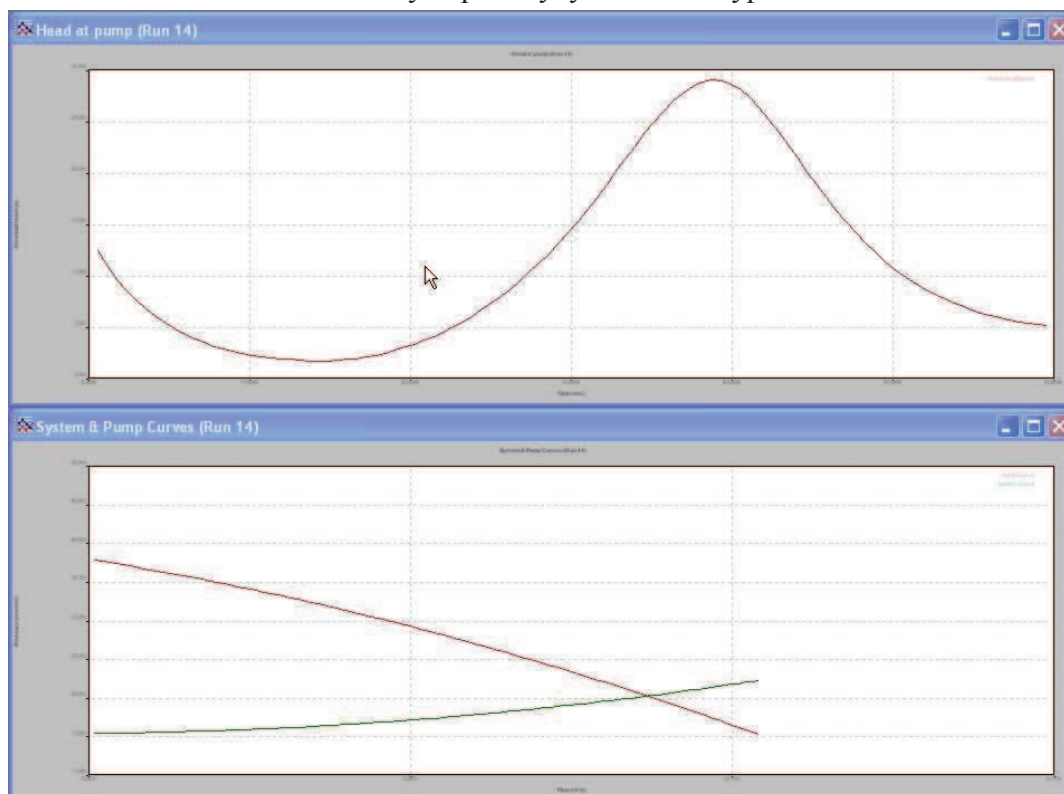


Obr.21 Nastavení parametrů dynamické analýzy neustáleného proudění

Výsledky:



Obr.22 Výstup analýzy ve formě výpisu



Obr.23 Výstup analýzy ve formě grafu

2.3.8 Závěrečné zhodnocení analýzy programu ARTS

Cílem této analýzy bylo ukázat práci s programem ARTS ve smyslu matematické modelace. V prvním modelu jsme simulovali průběh vodního rázu ve výtlačném potrubí a v druhém modelu byl proveden návrh expanzní nádoby takových parametrů, aby úspěšně zamezila šíření vodního rázu a eliminovala jeho účinky. Programem ARTS navádí uživatele při tvorbě jednotlivých objektů souhrnem podmínek spojených s navrhovanými parametry. Naproti tomu má i několik málo nedostatků, mezi něž bych zařadil například absenci funkce klávesy „Esc“ při rušení příkazu. Osobně bych práci s programem ARTS hodnotil jako velmi přínosnou a rád bych se jí věnoval i nadále.

2.4 PROGRAM EPANET

Program Epanet patří ke všeobecně velmi známým produktům. Jedná se o aplikaci, jejíž oficiální vydání se datuje do roku 2000. Tento software vznikl za financování státní organizace Spojených států amerických a přes svoje „stáří“ plní své účely i v dnešní době. Je používán v praxi stejně jako ve školství, jako výuková pomůcka při vysokoškolských studiích. V praxi je jeho užití v dnešní době zastihováno novějšími programy, které jsou však mnohdy postaveny na programovacím jádru právě Epanetu.

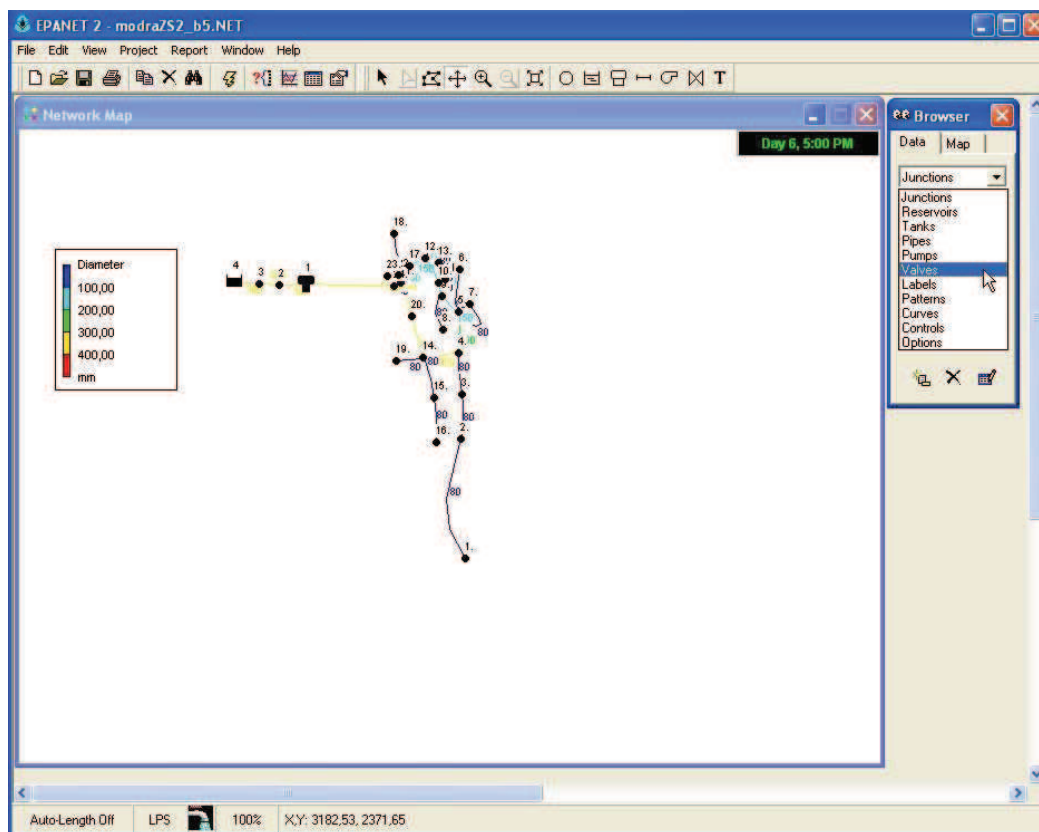
2.4.1 Seznámení

Epanet je výpočetním programem, který umožňuje statické a kvazi-dynamické simulace hydraulických poměrů a kvality vody v tlakových trubních systémech. Vodovodní síť v obecnosti sestává z mnoha různých typů objektů: Úseky potrubí, uzly – spojné body mezi jednotlivými úseky, čerpadla, různé druhy armatur – kupříkladu šoupátka, a také objekty, jež z hlediska působení gravitace zajišťují vhodný tlak (0,25 – 0,6 MPa) ve vodovodní síti - vodojemy a nádrže.

Tato aplikace je navržena jako pomůcka, jež nám má umožnit provádět hydraulické a jiné výpočty ve vodovodní síti a také nám má napomoci zlepšit chápání toho, jak se voda v trubní síti chová a k čemu během jejího pohybu dochází.

Epanet sleduje průtoky v jednotlivých úsecích, tlaky na uzlech, výšky hladin ve vodojemech a také koncentrace chemických látek/příměsí v průběhu průtoku vody vodovodní sítí od vodojemu až ke spotřebiteli. V rámci řešení koncentrací látek ve vodě umí řešit jak jejich nárůst, tak jejich úbytek a stáří dopravované vody. Tedy jak dlouho trvá, než voda urazí tu a danou vzdálenost v síti. Obvyklým příkladem může být simulace doby, za kterou voda dorazí z vodojemu ke spotřebiteli a nakolik si zachová své chemické vlastnosti.

EPANET pomáhá vyhodnotit alternativní strategie řízení pro zlepšení kvality vody v celém systému.



Obr.24 Pracovní plocha Epanetu

2.4.2 Systémové požadavky a dostupnost Epanetu

Epanet ver. 2 je kompatibilní s operačními systémy Windows a poskytuje kompaktní/ucelené prostředí pro práci s vodovodní sítí: provádění simulací hydraulických poměrů a kvality vody. Je dostupný volně ke stažení na webové stránce agentury U. S. EPA – Agentura na ochranu životního prostředí Spojených států amerických. Dle ne zcela aktuálního manuálu by neměl být problém při instalaci Epanetu na Windows 95/98/NT a na základě zkušenosti mohu potvrdit, že tento program též funguje v novějších Windows XP a také Windows 7.

2.4.3 Možnosti modelování hydraulických poměrů

Epanet poskytuje systém řešení hydraulické analýzy trubní sítě, která nemá omezenou velikost ani počet prvků, jež se v ní nacházejí (výhoda proti kupříkladu Autopenu). Počítá ztráty třením po délce s využitím rovnic dle Hazen-Williams, Darcy-Weisbach nebo Chezy-Manning a také do výpočtů zahrnuje ztráty na armaturách a tvarovkách. Modeluje čerpadla s konstantními, či proměnnými otáčkami a umí počítat náklady na jejich provoz. Umožňuje nastavení rozličných tvarů komor vodojemů, dále simulaci vícero odběrů na každém uzlu, kdy každý odběr může mít jiný časový průběh. Dokáže simulovat různé typy armatur, kupříkladu zpětnou klapku, ventil pro regulaci průtoku, ventil pro regulaci výstupního tlaku.

2.4.4 Simulační model kvality vody

2.4.4.1. Podmínka simulačního modelu kvality vody

Modelování parametrů kvality vody je vždy založeno na předchozí tvorbě hydraulického modelu konkrétní sítě. Do tohoto modelu je třeba zahrnout konkrétní změny hydraulických parametrů v čase. Těmi mohou být změny odběrů v čase, zapínání/vypínání čerpadel, nebo provozní hladiny vodojemů.

2.4.4.2. Výpočet kvality vody

Pro mnoho vodojemů provozovaných v režimu naplnění a postupného prázdnění postačuje předpoklad, že obsah jejich komor je dokonale promícháván (pokud má přítok dostatečnou průtokovou sílu). Za podmínek dokonalého míchání je koncentrace ve vodojemu směsí koncentrace vody, jež do vodojemu přitéká a zbytkové vody, jež vodojem neopustila od předchozího plnění.

Při modelování kvality vody v potrubí Epanet 2 využívá Langrangian time –driven method a v pevně stanovených časových krocích sleduje změny v potrubí sítě. Je uvažováno, že každý úsek potrubí je vyplněn segmenty/dávkami vody, jež si udržují svou „velikost“ a pořadí při průchodu potrubím a nedochází k jejich překrytí/smíchání. K jejich vzájemnému, okamžitému a dokonalému promíchání dochází pouze v uzlech s dávkami přicházejícími z křížných úseků. Tedy koncentrace látek v segmentu opouštějícím uzel je váženým průměrem koncentrací v segmentech na přítoku do uzlu. Každý segment vody v úseku si s sebou nese svou koncentraci rozpuštěných látek/příměsí, jež se v závislosti na čase mění. Tato koncentrace může růst (nárůst koncentrace Fe^{2+} vlivem reakce Cl^- s degradovaným materiálem na vnitřní stěně potrubí a u stěny potrubí), nebo naopak klesat (koncentrace desinfekčního činidla reagujícího s prostředím).

Epanet v případě řešení koncentrací započítává jak chemické reakce uvnitř nosné kapaliny, tak reakce procházející kapaliny se stěnami potrubí. Hlavní rovnice sloužící k řešení kvality vody jsou postaveny na principu zachování hmoty spolu s reakční kinetikou.

Kromě koncentrací chemických látek je Epanet schopen také vyhodnotit stáří vody (dobu zdržení) a trasovat miniaturní částici při průchodu tlakovou trubicí sítě.

2.4.4.3. Míchání vody ve vodojemech

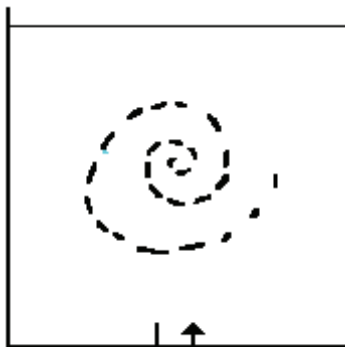
Epanet může využívat 4 různé typy modelace charakteristické pro procesy míchání uvnitř vodojemů:

- Úplné míchání
- Oddílné míchání
- FIFO plug flow
- LIFO plug flow
-

Typy modelování se mohou lišit v jednotlivých vodojemech umístěných na síti.

Model úplného míchání.

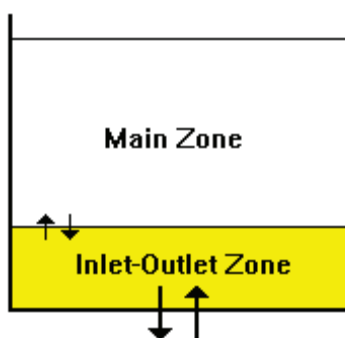
Tento model uvažuje, že veškerá voda, která vstoupí do nádrže se okamžitě a dokonale promíchává s vodou, která již v nádrži byla. Je to nejjednodušší forma promíchání kamapilny ve vodojemu, která nevyžaduje zadávání dalších charakteristických parametrů a je možno ji použít pro většinu vodojemů pracujících na principu naplnění a postupného vypouštění.



Obr.25 Schematické znázornění úplného míchání [11]

Model oddílného míchání

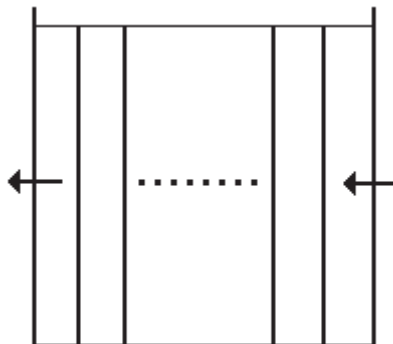
Tento model rozděluje dosavadní objem nádrže na dva oddíly, z nichž v každém uvažuje úplné promíchání. Vtokové a výtokové potrubí by se mělo nacházet v prvním oddílu. Přitékající voda tedy nejdříve vstupuje do spodní části prvního oddílu nádrže vodojemu. Jakmile se tento oddíl naplní, tak dojde k přepadu do druhého oddílu, kde dochází k promíchávání se zbytkovou vodou, jež se v oddílu nacházela. K odtoku dochází opět v prvním oddílu, zároveň do něj proudí stejné množství vody z druhého oddílu tak, aby došlo k vyrovnání možných rozdílů koncentrací. První oddíl může představovat „malý oběh vody“, zatímco druhý oddíl představuje oblast mrtvých zón. Uživatel musí zadávat jediný parametr navíc, a to je poměr celkového objemu nádrže vodojemu k jejímu prvnímu oddílu.



Obr.26 Schematické znázornění oddílného míchání [11]

FIFO (First In – First Out)

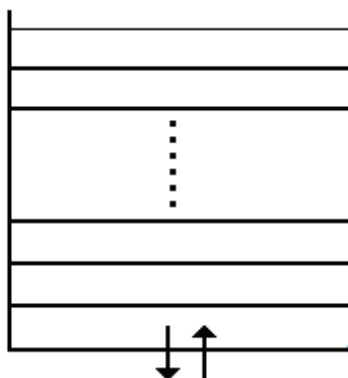
Tento model nepředpokládá žádné směšování vody během zdržení v nádrži a naopak uvažuje, že dávky procházejí vodojemem v daném pořadí. Tedy dávka, která vtekla do nádrže jako první, opouští nádrž jako první. Fyzikálně řečeno, tento model je nejvhodnější pro průtokové nádrže, které pracují se současným přítokem a odtokem. Zde není třeba zadávat další parametry.



Obr.27 Schematické znázornění míchání na principu FIFO [11]

LIFO (Last In – First Out)

Taktéž tento model nepředpokládá promíchávání dávek vody při vstupu do vodojemu. Avšak oproti FIFO modelaci se uvažuje hromadění dávek jedné za druhou (na druhé), kdy dávky vtékají a odtékají z nádrže v jejím dně. Dávka, vstupující do vodojemu poslední z něj při vypouštění odtéká jako první. Tento model se uplatňuje u vysokých, úzkých nádob se vtokem a výtokem ve dně a současně malou hybností/silou toku vody. Nevyžaduje zadávání dalších parametrů.

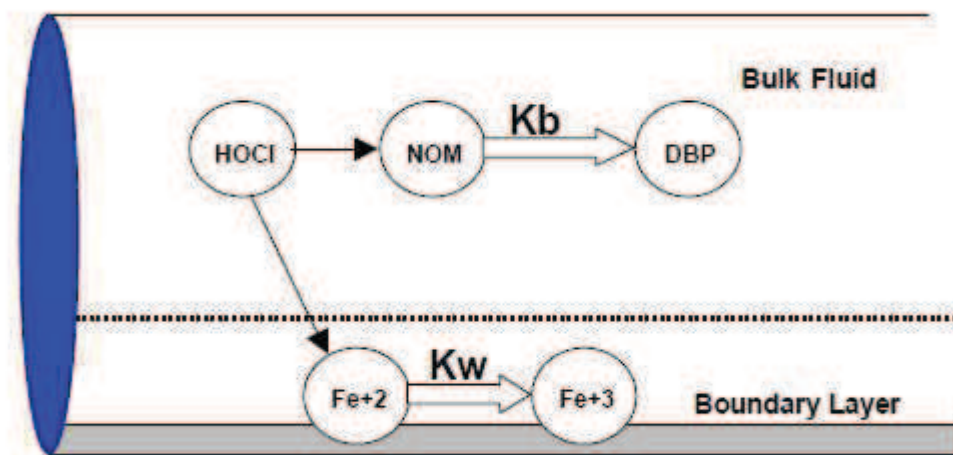


Obr.28 Schematické znázornění míchání na principu LIFO [11]

2.4.4.4. Reakce související s kvalitou vody v trubní síti.

Epanet je schopen sledovat nárůst, či pokles koncentrace látek obsažených ve vodě, způsobený jejich reakcí při průtoku sítí. Aby byl schopen této funkce, je třeba znát míru reakce závisící na koncentraci té dané látky. Reakce se mohou vyskytovat „v samotném toku“ kapaliny, stejně tak podél stěn potrubí. Toto je znázorněno v obrázku č. 28). Volný chlór reaguje s přírodními organickými látkami ve vodním prostředí a je zároveň přenášen

skrže vazebnou vrstvu ke stěně potrubí, kde oxidační kationty železa vyloučené degradací materiálu potrubí. Epanet umožňuje uživateli rozlišovat tyto dva způsoby reakcí a případně je řešit separátně.



Obr.29 Schéma reagujícího desinfekčního činidla (volný chlór) v proudící vodě a na stěně potrubí[11]

2.4.4.4.1. Reakce v proudící vodě

Při průtoku vody potrubím nebo jejím skladování ve vodojemu dochází k reakci s látkami/příměsími obsaženými ve vodě. Míra reakce může být obecně popsána jako mocninná funkce koncentrace:

$$r = k C^n \quad (3)$$

Kde je:

K ...reakční konstanta

n ...řád reakce

C ...koncentrace látky

Pokud existuje limitní koncentrace růstu nebo úbytku dané látky, pak je míra reakce

$$R = K_b(C_L - C) * C^{(n-1)} \quad \text{pro } n > 0, K_b > 0 \quad (4)$$

$$R = K_b(C - C_L) * C^{(n-1)} \quad \text{pro } n > 0, K_b < 0 \quad (5)$$

Kde C_L je limitní koncentrace.

Příklady reakcí různého řádu mohou být:

- Prostý úbytek prvního řádu

Úbytek látek, jako je například chlor, lze modelovat jako prostou reakci prvního řádu.

- Saturační růst prvního řádu

Tento model je možno aplikovat na růst vedlejších produktů, které vznikají při působení dezinfekčních činidel (THM - trihalogenmethany). V tomto případě je tvorba vedlejšího produktu (C_L) limitována množstvím přítomných reaktivních prekurzorů.

- Dvoukomponentní úbytek druhého řádu

Tento model uvažuje reakci látky A s látkou B v neznámém poměru, při níž vzniká produkt P. Míra úbytku A je poměrná zbývajcímu množství/koncentraci produktu A a B. Na základě toho, zda je v přebytku látka A, či látka B může mít CL kladnou nebo zápornou hodnotu. Aplikace tohoto modelu nastává při řešení úbytku chloru, jež by neodpovídal jednoduchému modelu prvního řádu.

- Kinetika úbytku Michaelis-Menton

V případě, že je specifikován záporný řád reakce n počítá Epanet s rovnicí Michaelis-Menton pro reakci úbytku (při úpravě jmenovatele lze použít i pro výpočet růstu). Tato rovnice je často užívána pro popis mikrobiálního růstu a reakcí katalyzovaných enzymy. Při nízkých koncentracích simuluje chování podle reakce prvního řádu, při vyšších koncentracích dle nultého řádu. Pro reakce úbytku látky musí být CL vyšší než počáteční koncentrace.

- Růst nultého řádu

Může být použit pro modelování stárí vody, kde s každou jednotkou času roste také „koncentrace času“ o jednu jednotku.

2.4.4.4.2. Reakce u stěny potrubí

Během proudění vody vodovodní sítí se mohou látky rozpuštěné ve vodě dostat ke stěně potrubí a reagovat s látkami jako jsou korozní produkty nebo biofilm. Plocha stěny potrubí dostupná k průběhu reakce a míra přestupu hmoty mezi proudící vodou a stěnou má vliv na celkovou míru této reakce. Pro kinetiku 1. řádu může být míra reakce na stěně potrubí vyjádřena jako:

$$r = \frac{2k_w \cdot k_f \cdot c}{R \cdot (k_w + k_f)} \quad (6)$$

kde je:

k_w	...konstanta poklesu koncentrace látky u stěny pro rovnici I. řádu, [délka/čas]
k_f	...je koeficient přestupu hmoty, [délka/čas]
R	...poloměr potrubí.

2.4.4.4.3. Stáří vody a trasování/stopování vody

Kromě chemických změn je Epanet schopen modelovat také stáří vody při průtoku sítí. Stáří vody je doba, za níž voda doteče od zdroje ke spotřebiteli (případně od uzlu k uzlu). Upravená voda, má na svém vtoku do počátečního bodu věk roven 0 (počátečním bodem může být vodojem, či některý z uzlů). Stáří vody je jedním z parametrů celkové kvality dopravované vody. Stáří se počítá jako míra reakce s nultým řádem kinetiky reakcí a konstantou míry reakce rovnou 1.

Epanet taktéž může trasovat vodu při jejím proudění tlakovou trubicí sítí. Toto sledování probíhá v závislosti na čase a určuje, kolik procent vody z toho a daného zdroje doteče do konkrétního uzlu. Epanet uvažuje, že voda vstupující z každého vodojemu do sítě má stoprocentní koncentraci. Toto trasování je užitečné pro analýzu vícezdrojových vodních sítí. Ukazuje, do jaké míry se voda z jednoho zdroje míchá s vodou z ostatních zdrojů a jak probíhá míchání v prostoru sítě v závislosti na čase.

2.4.5 Analýza kvality vody – modelový příklad

V Epanetu lze provádět množství různých typů analýz. Ať už jde o analýzy týkající se chemismu ve vodovodní síti, nebo hydrauliky, či jiných typových úloh. Práce s Epanetem není ve své podstatě složitá. Složitě je analýzu napoprvé provést správně, neboť manuál k tomuto programu je z podstatné části ve slovní formě a popisnost obrazové podpory například u analýzy kvality vody chybí.

Jako vhodný typ ukázky posouzení jednoho z parametrů kvality vody jsem si zvolil analýzu stáří vody.

Pro analýzu je nutno zadat model vodovodní sítě. Pro tento účel jsem použil tlakovou trubicí síť, kterou jsem posuzoval z hlediska hydraulických poměrů v předmětu „Projekt VHO“ během 4. ročníku mého studia.

V rámci tohoto projektu jsem si vybral jako svůj podklad obec Modrá, kterou jsem poté na základě tehdejších posloupností nově nabytých znalostí zpracoval. Tato obec má přibližně 650 obyvatel, tedy jedná se o spotřebiště malého rozsahu, avšak pro příkladovou analýzu „stáří vody“ postačuje.

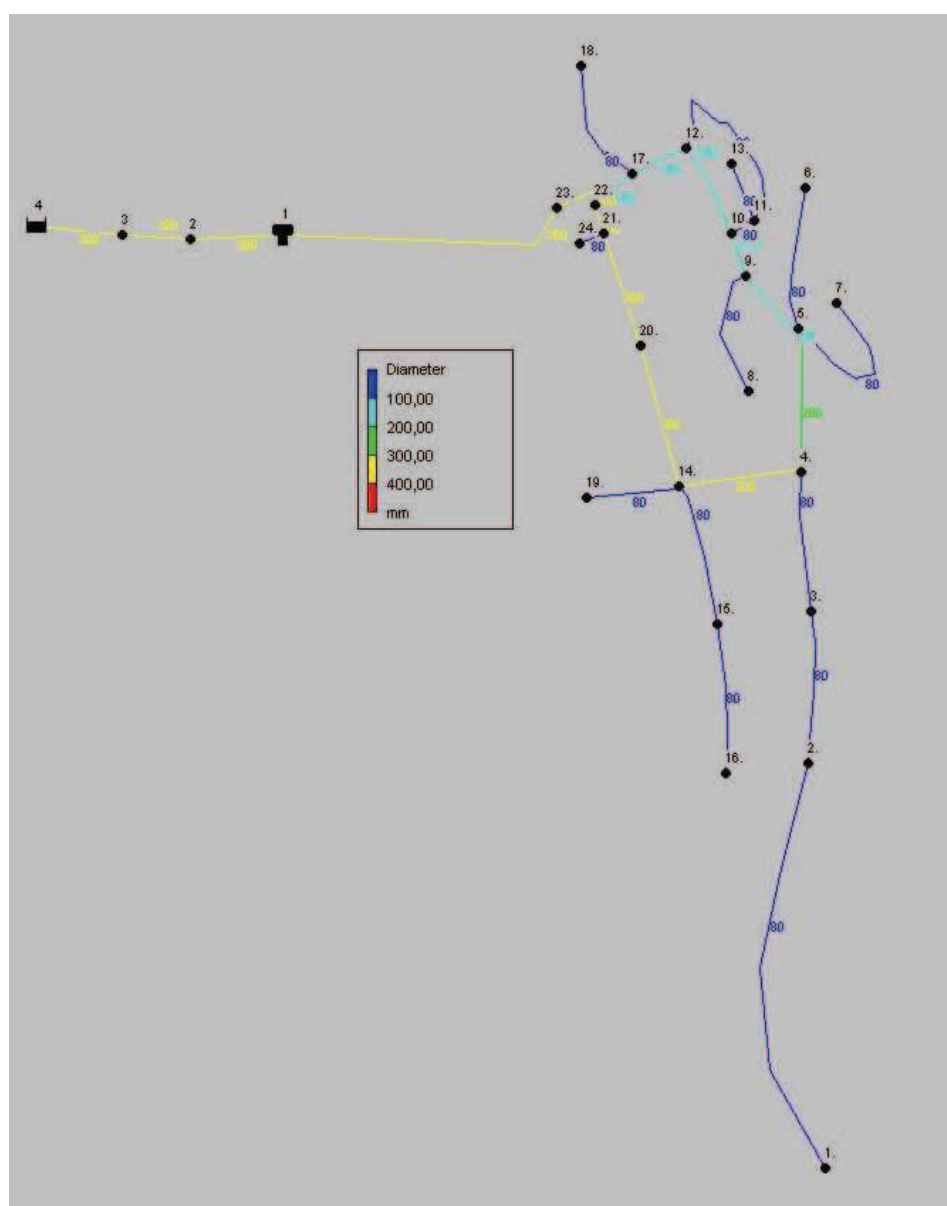
Obec Modrá se nachází v okrese Uherské Hradiště poblíž obce Velehrad a je vetknuta do podlouhlého údolí Modřanského potoka. Po obou stranách tohoto potoka je provedena zástavba a také tudy vedou dvě hlavní příjezdové cesty mířící od obce Velehrad směrem do centra obce Modrá. Vodovodní síť v tomto modelovém příkladu byla navržena především v chodnicích vedoucích podél komunikací.

Pro potřebu hydraulické analýzy, jež je podmínkou k provedení analýzy kvalitativních poměrů vody, bylo v tomto modelu vytvořeno 24 uzlů ve vhodných místech a odpovídající množství úseků, jež uzly spojovaly. Vodojem byl umístěn na levém hřebeni údolí při pohledu

proti proudu toku Modřanského potoka. Tento vodojem se tam ve skutečnosti nenachází a posloužil pouze k potřebám modelového řešení hydraulické analýzy vodovodní sítě.

Z důvodu využití možností analýzy byly k odběrům vody pro obyvatele přidány modelové odběry pro školu, hotel, pivovar, stáj pro chov koní a především denní potřebou vody se vymykající jatka. Tato modelová, pro malou obec mimořádně velká potřeba vody vedla při hydraulické analýze k návrhu poměrně velkých průměrů potrubí. Pro úsek vedoucí z vodojemu byl zvolen průměr DN 350 a pro vytíženější úseky v okružové vodovodní síti DN 150, DN 200, resp. DN 250. Na tak malou obec vsutku nadstandartní rozměry.

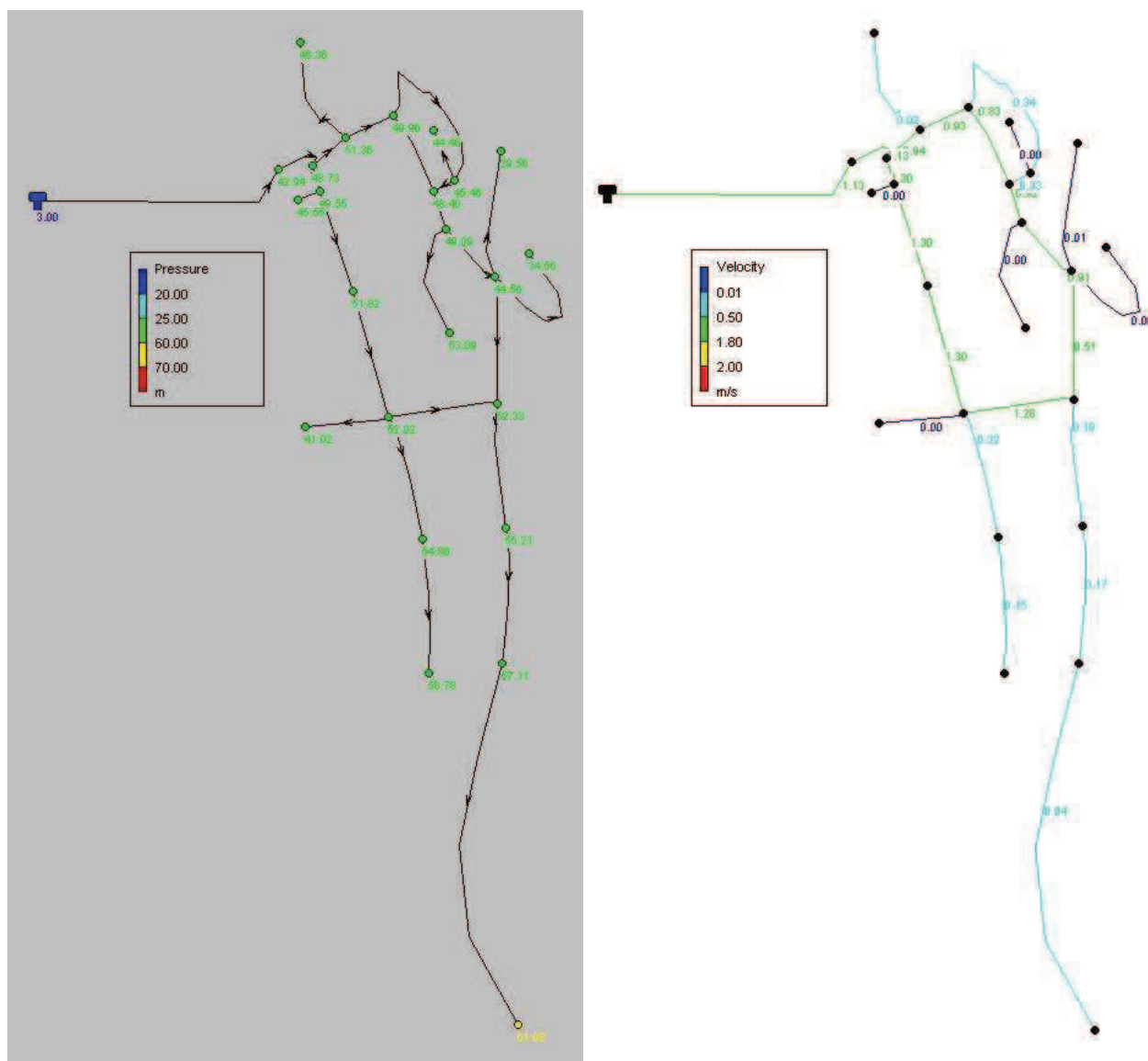
V menších uličkách a na uzlech bez těchto přídavných zemědělských, průmyslových společenských odběrů se nachází profily DN 80. Větších není v těchto místech třeba, neboť svojí kapacitou průtoku naprosto postačují uspokojit odběry na uzlech. Odběry byly vypočítány na základě metody redukovaných délek a byla do nich započítána taktéž voda nefakturovaná (VNF), jež zpodobňuje ztráty vody na síti.



Obr. 30 Schéma rozdělení průměrů potrubí na síti v modelovém příkladu

Poté byla provedena již zmíněná statická analýza hydraulických poměrů, kdy bylo zjištěno, že vodojem a navržená síť, rychlosti v jejích úsecích, a zejména přetlaky na uzlech odpovídají vymezeným intervalům pro vodovodní síť:

- na základě ČSN 75 5401 Navrhování vodovodních sítí:
pro přetlak na uzlech platí rozmezí: 0,25 – 0,6 MPa, vyjímečně 0,7 MPa
- na základě ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb, Zásobování požární vodou:
pro přetlak na hydrantech platí: min 0,20 MPa, hydrostatický tlak
min 0,05 MPa, hydrodynamický tlak



Obr. 31 Schéma distribuce tlaků na uzlech (vlevo) a rychlosti v potrubí v síti (vpravo)

2.4.5.1. Analýza kvality - stáří vody

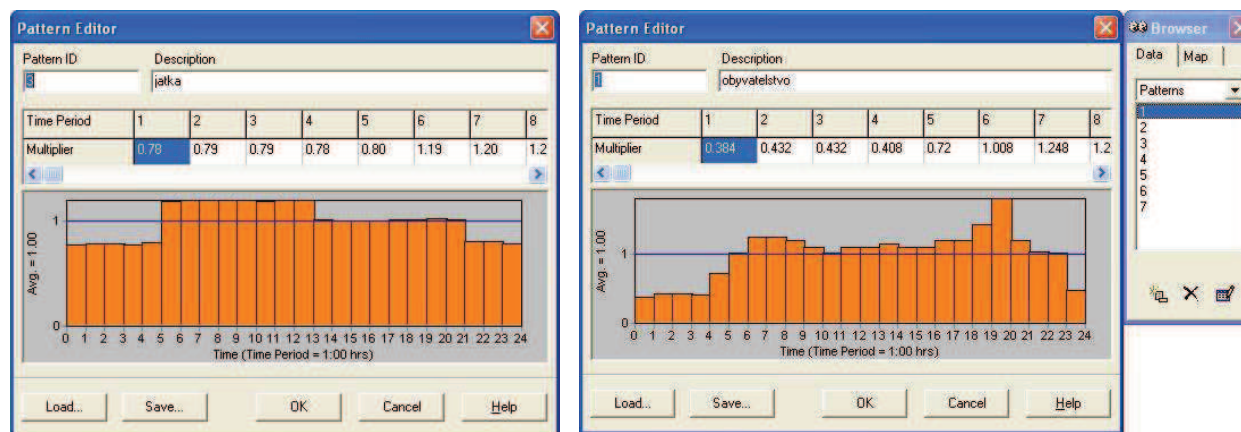
K posouzení jednoho z parametrů kvality vody byla zvolena kvazi – dynamická analýza stáří vody, tedy doby, za kterou voda doteče od provozovatele, resp. úpravný vody až k samotnému spotřebiteli. Nebo v opačném pohledu se stáří vody posuzuje ve smyslu tom, jak stará voda doproudí k tomu a danému spotřebiteli na tom a konkrétním místě v síti. Je zjevné, že věk vody ve vodovodním kohoutku spotřebitele se liší a obecně „nejčerstvější“ voda je u spotřebitelů, kteří se nacházejí nejbližší vodojemu. Naopak nejstarší voda doproudí k nejvzdálenějšímu spotřebiteli. Při transportu vody na větší vzdálenosti tak je třeba vodu dopravovat. To se děje na vodojemech, v nichž dochází zejména k dochlorování vody, neboť v průběhu transportu vody se koncentrace desinfekčních činidel vinou chemických reakcí ve vodě snižuje. Zde se ale analýza týká jiného problému, a to stáří vody.

Vždy při určování stáří vody je nutno znát odběry na síti. V obecném pohledu by bylo možno prohlásit, že čím větší jsou odběry na síti a čím vzdálenější tyto odběry od vodojemu na této síti jsou, tím mladší, rozumějme čerstvější, voda se ke spotřebiteli (jež se nachází mezi vodojemem a těmito odběry) dostane. V našem modelovém případě tedy byly právě z tohoto důvodu voleny významnější odběry na vzdálenějších místech od vodojemu. Je to jistě teoretická rovina řešení vymykající se praxi, kde jsou podmínky jasně dány topologií sítě a urbanizací území. Topologie je buď neměnně spjatá s realitou, nebo z výhledového hlediska omezena předpoklady výstavby a zaměření konkrétních objektů na budoucí vodovodní síti.

Analýza stáří vody

Nejdříve ze všeho bylo nutno upravit již provedenou hydraulickou analýzu přidáním přítoku do vodojemu. Ten samotný by jinak nemohl fungovat způsobem blízkým realitě, neboť by se pouze prázdnil a nebyl by doplňován a tak by po vyčerpání vody z vodojemu došlo k disfunkci tlakových poměrů na síti, průtoků a samotné analýzy stáří. Přítok na vodojem byl nejdříve volen jako záporný odběr z nově vytvořeného uzlu před vodojemem, posléze byla přidána nádrž – rezervoár s konstantní hladinou, který nese funkci úpravný vody. Tímto krokem bylo dosaženo reálnějšího chování hladin ve vodojemu.

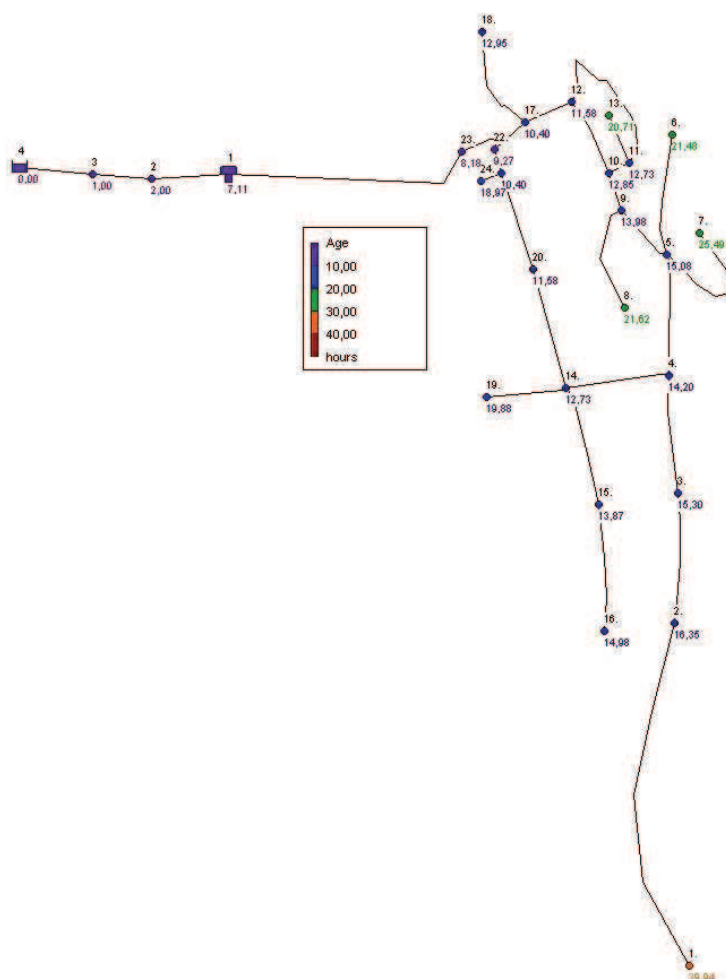
Dalším přípravným krokem byla tvorba koeficientu popisující rozložení denní nerovnoměrnosti odběrů. Bylo tak učiněno v časových krocích 1 hodiny po dobu 24 hodin. Vzniklo tedy 24 koeficientů, charakterizujících náročnost odběru pro každou denní hodinu. Tato posloupnost 24 číselných hodnot (koeficientů) se v Epanetu nazývá „Pattern“ – výplň, a je třeba ji provést zvlášť pro odběry související s obyvatelstvem a zvlášť pro odběry, kde dochází ke kombinaci kupříkladu odběru obyvateli a zároveň průmyslem. Tímto způsobem bylo v excelu vytvořeno 5 různých, a pro odběry tohoto cvičení typických, „Patternů“, které byly následně vloženy do poznámkového bloku a byl jim přepsán formát z „.txt“ na „.pat“. Formát „.txt“ Epanet nepřijímá a nepracuje s ním.



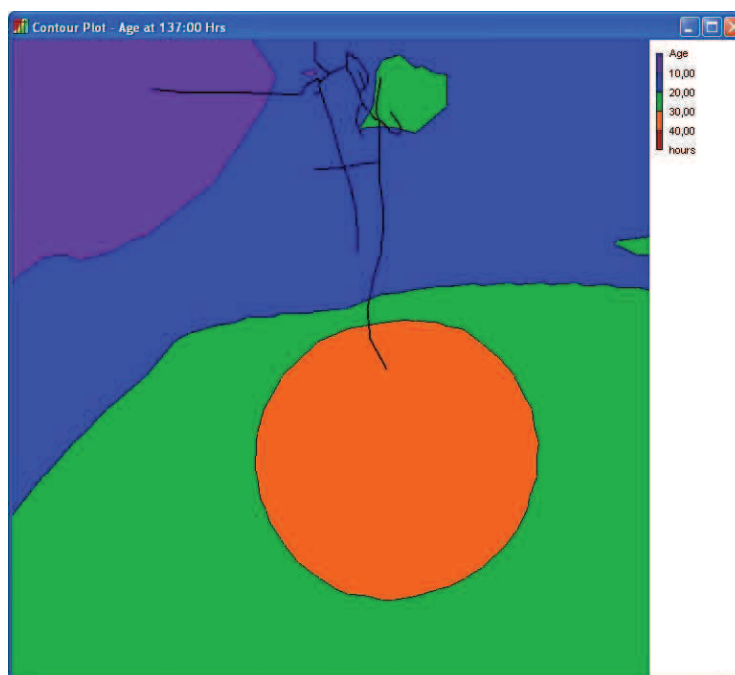
Obr.32 Zobrazení rozdělení denních „Patternů“ na uzlech pro jarka a obyvatelstvo

V dalším kroku bylo nutno tyto „Patterny“ vložit do Epanetu v nabídce „Data“ -> „Patern“ -> „Create new“. Každý „Pattern“ musel nést své jméno a popis. Je doporučeno využívat numerická označení jednotlivých „Patternů“ a jejich samotný název vkládat do „Popisu Patternu“. Následně po uložení všech „Patternů“, které charakterizují kombinace odběrů na síti, je třeba vzít každý konkrétní uzel a do kolonky „Demand Pattern“ vložit číselné označení typu „Patternu“ postihujícího odběry na tomto uzlu. (Odběry se na síti neřeší jednotlivě, ale přepočítávají se na uzly). Je třeba dbát jak na pečlivost provedení výpočtu koeficientů, tak na vytváření samotných „Patternů“ a jejich označení na uzlech, neboť každá konkrétní chyba ovlivňuje průběh analýzy a je označena ve „Warning statusu“. Postupné dohledávání chyb je časově velmi náročné a je téměř jednodušší vypracovat projekt znova.

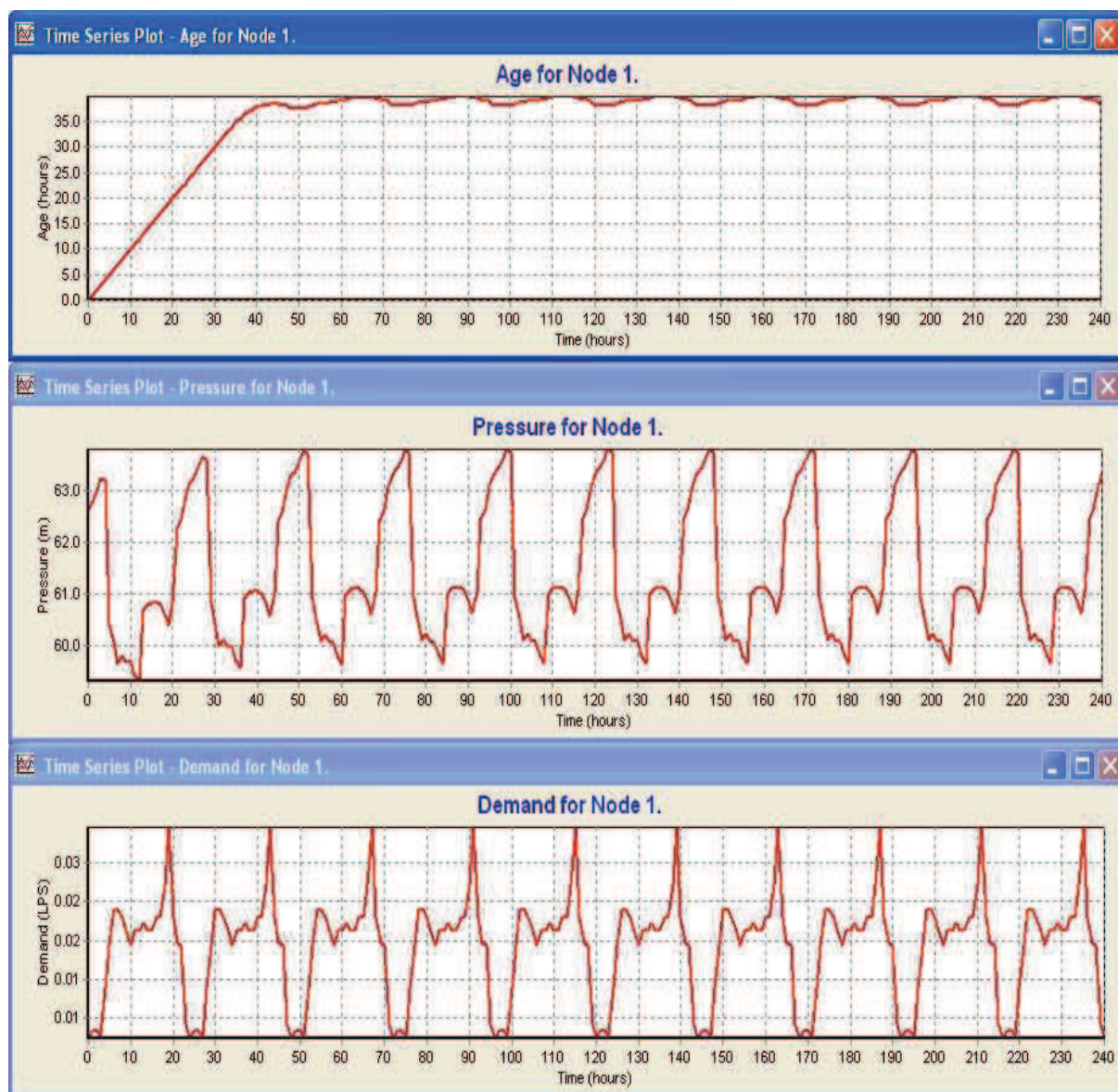
Po odstranění jednotlivých chyb, jež odhalíme v analýze a po konečně správném provedení analýzy je možno zkontrolovat průběh řešení na grafickém, či tabulkovém výstupu. Jako názornější se ukázala být forma výstupu v podobě grafu. Je na něm zjevné, jak „stará“ voda dorazila do konkrétního uzlu v konkrétní denní hodinu. Čím vyšší byl odběr v uzlu, potažmo v celé síti, tím „čerstvější“ voda do uzlu proudila. Bylo tomu tak především v době denních špiček. V nočních hodinách naopak trvalo podstatně déle celé síti spotřebovat vodu, která se v ní nachází a tak byl věk vody nad ránem vyšší, než věk odebírané vody po proběhnutí špičky v odběrech. Je nutno vzít v potaz taktéž rostoucí počátky křivek, kde na základě úvahy Epanet počítá „stáří vody“ v konkrétním uzlu na počátku analýzy jako nulové a až po přítoku vody z vodojemu zobrazuje reálné hodnoty stáří vody.



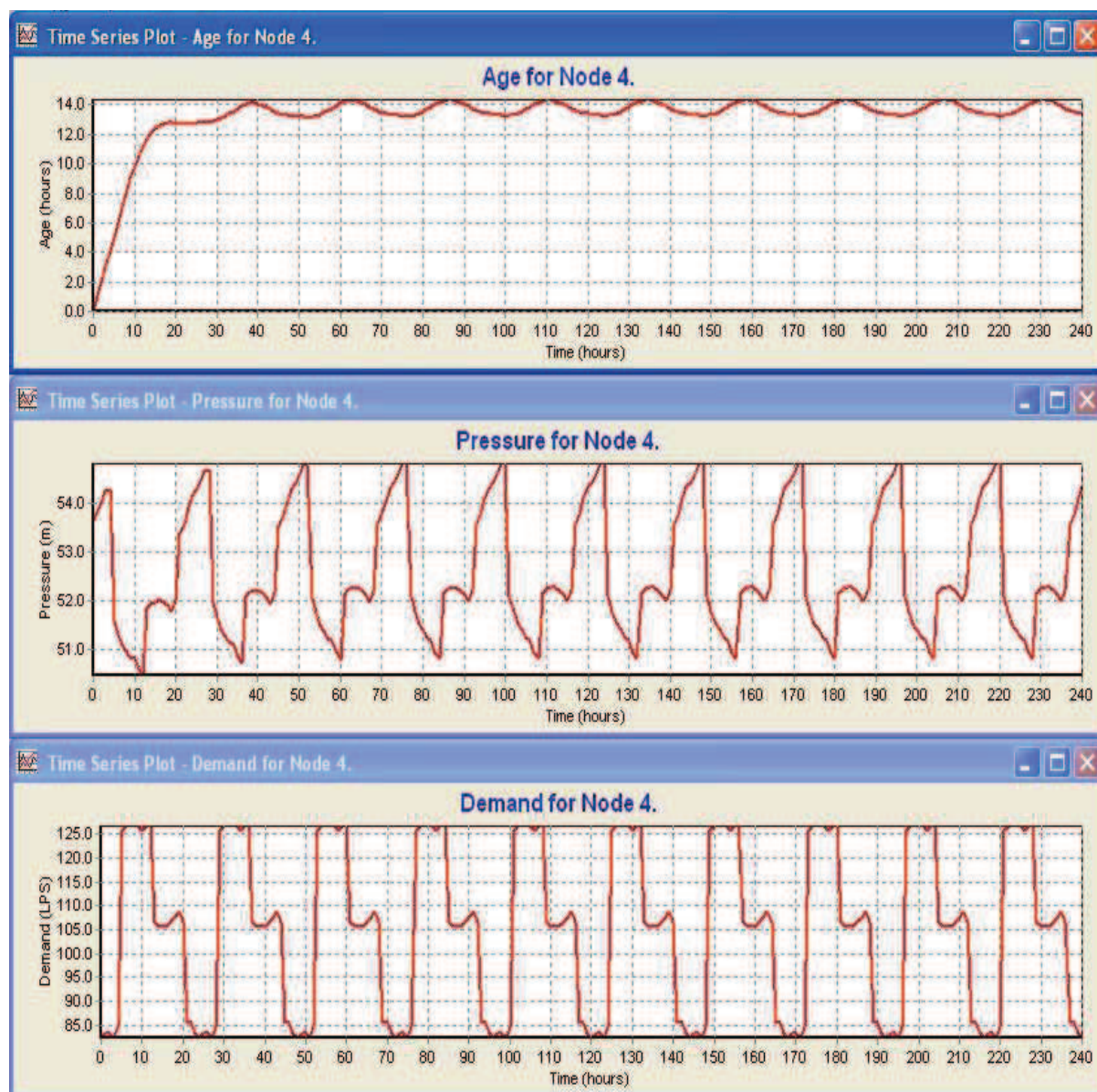
Obr.33 Zobrazení stáří vody na schématu sítě v čase $t=137$ hod



Obr. 34 Zobrazení stáří vody na vrstevnicovém grafu v čase $t=137$ hod



Obr.35 Zobrazení závislosti stáří, tlaku a odběrů na uzlu 1 (nejvzdálenější uzel sítě)



Obr. 36 Zobrazení závislosti stáří, tlaku a odběrů na uzlu 4 (jatka)

2.4.6 Závěrečné zhodnocení analýzy/ programu Epanet

Při řešení jednotlivých procesních kroků je nutno být pečlivý a po zvládnutí a zažití první analýzy se následné další obdobné úlohy stávají poměrně snadnými. Vždy však záleží na komplexnosti a velikosti samotné vodovodní sítě. Z teoretického průběhu této analýzy mohou zhodnotit, že analýza stáří vody v Epanetu je uplatnitelná v praxi, přestože vždy při jejím řešení je třeba sáhnout ke zjednodušením. Důkazem pravdivosti tohoto tvrzení je také to, že na výpočetním modulu Epanetu pracuje mnoho dalších novějších výpočtových programů, jako je například HydraulINET, či MIKE NET. Ty díky své aktuálnosti a novějším úpravám ve srovnání s Epanetem mohou přinést sofistikovanější řešení i formu výstupu.

3 ZÁVĚR

Předmětem této bakalářské práce je shromáždění informací o softwarových prostředcích, jež mají uplatnění v matematickém modelování vodárenské problematiky.

Bakalářská práce je tvořena třemi základními částmi.

První část představuje a přibližuje několik vodárenských pojmů, které souvisí, nebo jsou řešeny programy obsaženými v této práci.

V druhé části je možno se v krátkých člancích seznámit s několika programy. Tyto programy je možno dělit na dva typy. Jeden typ programů se primárně zabývá analýzou tlakových trubních sítí, do druhého typu jsou zahrnuty aplikace řešící ostatní úlohy související s prací projektanta a jeho návrhy ve vodárenství.

Třetí, závěrečná část, je rozdělena na dvě poloviny. V první polovině došlo k představení programu ARTS, jež patří do skupiny programů zabývajících se i jinými problémy, než pouze analýzou vodovodní sítě. V programu ARTS jsem řešil úlohu – analýzu vodního rázu. V druhé polovině jsem zpracoval program Epanet nejen z obvyklého pohledu hydraulické analýzy sítě, ale především z hlediska řešení kvalitativních parametrů na tlakové trubní síti. Následně jsem zpracoval jednu z úloh, které řeší Epanet – analýzu stárí vody ve vodovodní síti. Záměrně byly vybrány a úlohy, jež nepatří k velmi častým. Účelem bylo, abych si tyto aplikace a typy analýz osvojil a mohl s nimi případně nadále pracovat za účelem tvorby mé budoucí diplomové práce.

4 POUŽITÁ LITERATURA

- [0] TUHOVČÁK, CSC., Ing. Ladislav, Ing. Pavel ADLER, CSC., Ing. Tomáš KUČERA, PH.D. a Ing. Jaroslav RACLAVSKÝ, PH.D. *Vodárenství*, Brno, 2006. Studijní opory. VUT v Brně.
- [1] M. HAESTAD, T.M. WALSKI a kolektiv. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, první vydání. Waterbury, CT USA: HAESTAD PRESS, 2004.
- [2] HYDROMANTIS. *Program WATPRO* [online]. Kanada, 2012 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.hydromantis.com/WatPro.html>
- [3] XANADU. *Program Sewer+* [online]. 2000 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.cadstudio.cz/prod/sewer.asp>
- [4] HYDROPROJEKT. *Program Winplan* [online]. 1998 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: www.winplan.cz
- [5] EPA U. S. *Program Epanet* [online]. United States of America, 2000 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>
- [6] ING. LUBOMÍR BUCEK. *Programy AutoPEN* [online]. Liberec, 1992 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: www.autopen.cz
- [7] ARTS hydraulic design software. *USER MANUAL* [online]. 1998, č. 4 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.aquavarra.ie/arts/download.html>
- [8] AUTODESK. *Program HydraulCAD* [online]. 1998 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.hydraulicad.com>
- [9] DHI. *Mike NET Manuál* [online]. 2010 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MIKE_NET_OverviewGuide.pdf
- [10] ŠVARC, Pavel. *Modelování a řízení kvality vody ve vodárenské síti*. Praha, 2010. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Horáček, CSc.
- [11] ROSSMAN, Lewis A. EPANET 2 USERS MANUAL. _ [online]. 2000, č. 3 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet/EN2manual.PDF>
- [12] SLAVÍČKOVÁ, PH.D., Ing. Kateřina. KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. *Změny kvality vody při dopravě. A jejich modelování v programu Epanet 2oncentrací železa v distribuční síti pitné vody* [online]. 2002, č. 1, s. 5 [cit. 2012-05-05]. DOI: EPA/600/R-00/057. Dostupné z: <http://www.smv.cz/res/data/014/001643.pdf>
- [13] SLAVÍČKOVÁ, Ph.D., Ing. Kateřina, Prof. Ing. Alexander GRÜNWALD, CSc, Ing. Marek SLAVÍČEK, Ph.D., Ing. Bohumil ŠTASTNÝ a Ing. Klára ŠTRAUSOVÁ. KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. *Modelování úbytku chloru a nárůstu koncentrací železa v distribuční síti pitné vody* [online]. 2004, s. 6 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.smv.cz/res/data/014/001699.pdf>
- [14] *FineHomebuilding.com* [online]. 2007 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.finehomebuilding.com/how-to/qa/eliminate-water-hammer-banging-pipes.aspx>

5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 Některé z typických denních křivek spotřeb vody pro různé druhy odběratelů	3
Obr.2 Schéma funkce expanzní nádoby při výskytu vodního rázu	6
Obr.3 Schéma úpravní vody v programu WATPRO a logo programu WATPRO	7
Obr.4 Ukázka schématu vodovodní sítě v Epanetu a logo agentury EPA	9
Obr.5 Ukázka pracovní plochy aplikace Výpočet vodovodní sítě a logo Autopen	11
Obr.6 Ukázka pracovní plochy HydraulICAdu	12
Obr.7 Ukázka pracovní plochy MIKE NET	13
Obr.8 Ukázka pracovní plochy programu ARTS	15
Obr.9 Ukázka schématu paralelního zapojení soustavy čerpadel	16
Obr.10 Ukázka hydraulicky vyřešeného schématu okružové (vlevo) a větvené (vpravo) tlakové trubní sítě	17
Obr.11 Ukázka prvního listu panelů „Vlastnosti“ pro žlab (vlevo) a přeliv (vpravo)	18
Obr.12 Ukázka vyřešeného hydraulického profilu ČOV (nadm. výšky) [hhh]	19
Obr.13 Diagram Q-p a Q-H	20
Obr.14 Schéma výtlačného řadu	20
Obr.15 Zvolený průběh podélného profilu výtlačného řadu	21
Obr.16 Nastavení parametrů dynamické analýzy neustáleného proudění	21
Obr.17 Výstup z analýzy ve formě výpisu	22
Obr.18 Výstup z analýzy ve formě grafu	22
Obr.19 Schéma výtlačného řadu s expanzní nádobou	23
Obr.20 Nastavení „Vlastností“ expanzní nádoby	23
Obr.21 Nastavení parametrů dynamické analýzy neustáleného proudění	23
Obr.22 Výstup analýzy ve formě výpisu	24
Obr.23 Výstup analýzy ve formě grafu	24
Obr.24 Pracovní plocha Epanetu	27
Obr.25 Schematické znázornění úplného míchání	29
Obr.26 Schematické znázornění oddílného míchání	29
Obr.27 Schematické znázornění míchání na principu FIFO	30
Obr.28 Schematické znázornění míchání na principu LIFO	30
Obr.29 Schéma reagujícího desinfekčního činidla (volný chlór) v proudící vodě a na stěně potrubí	31
Obr.30 Schéma rozdělení průměrů potrubí na síti v modelovém příkladu	34
Obr.31 Schéma distribuce tlaků na uzlech (vlevo) a rychlosti v potrubí v síti (vpravo)	35
Obr.32 Zobrazení rozdělení denních „Patternů“ na uzlech pro jatka a obyvatelstvo	37
Obr.33 Zobrazení stáří vody na schématu sítě v čase $t=137$ hod	38
Obr.34 Zobrazení stáří vody na vrstevnicovém grafu v čase $t=137$ hod	38
Obr.35 Zobrazení závislosti stáří, tlaku a odběrů na uzlu 1 (nejvdálenější uzel sítě)	39
Obr.36 Zobrazení závislosti stáří, tlaku a odběrů na uzlu 4 (jatka)	40

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ρ	... měrná hmotnost vody [kg/m ³]
e	... tloušťka stěny potrubí [m]
E_v	... modul objemové pružnosti vody [Pa]
d	... průměr potrubí [m]
E_p	... modul pružnosti materiálu [Pa]
v	... průtočná rychlost [m/s]
a	... postupová rychlost [m/s]
g	... tíhové zrychlení [m/s ²]
kw	...konstanta poklesu koncentrace látky u stěny pro rovnici I. řádu, [délka/čas]
k_f	...je koeficient přestupu hmoty, [délka/čas]
R	...poloměr potrubí.